



Konstrukce přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jiří Švorc**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Konstrukce přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena

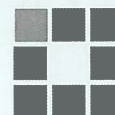
Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Švorc**
Osobní číslo: **S17000397**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Základní mechanické zkoušky používané pro hodnocení tvářitelnosti tenkých ocelových plechů.
2. Možnosti bezkontaktní analýzy deformace při laboratorních testech.
3. Konstrukční návrh přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena s možností bezkontaktní analýzy deformace v průběhu zkoušky.
4. Výroba přípravku a testy funkčnosti navrženého řešení pro zvolený materiál.
5. Závěr.



Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] KUHN, H., D. MEDLIN, ed. *ASM HANDBOOK Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [2] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.
- [3] HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.
- [4] TMĚJ, J., MIKEŠ, V. *Teorie tváření*. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1990. s. 178. ISBN 80-7083-011-5.
- [5] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: ALFA, 1985. s. 401. ISBN: 063-552-89.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání práce: 31. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

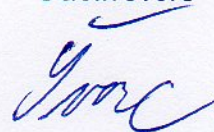
Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

3. 5. 2019

Bc. Jiří Švorc



Konstrukce přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena

Anotace

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývá mechanickými zkouškami pro hodnocení tvařitelnosti plechů v oblasti plošného tváření a principy bezkontaktního snímání a analýzy deformace při laboratorních testech. Praktická část práce řeší návrh, výrobu a testy přípravku pro zkoušku podle Erichsena, navrženého pro biaxiální zařízení s možností bezkontaktní analýzy deformace.

Klíčová slova

Mechanické zkoušky tváření, fotogrammetrie, zkouška podle Erichsena

Construction of the Erichsen cupping test jig

Annotation

The thesis is concerned with mechanical tests of formability in the area of sheet metal forming and principles of contactless scanning and evaluation of deformation process by laboratory testing. The practical part is solving design, manufacturing, and testing of the Erichsen cupping test jig, which was designed for a biaxial hydraulic machine with the possibility of contactless deformation analysis.

Keywords

Mechanical forming tests, photogrammetry, Erichsen cupping test

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce, doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jeho profesionální přístup, odbornou, ochotnou pomoc a spolupráci při tvorbě diplomové práce. Poděkování patří i mé rodině, která mě během studia podporovala.

Diplomová práce vznikla s podporou řešení projektu studentské grantové soutěže SGS 21280 „*Výzkum a vývoj pro inovace materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství*“ na Technické univerzitě v Liberci v rámci účelové podpory specifického vysokoškolského výzkumu poskytnuté Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR v roce 2019.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1. Úvod	11
2. Zkoušky mechanických vlastností plechů.....	12
2.1 Statická zkouška tahem.....	12
2.1.1 Smluvní a skutečný tahový diagram.....	12
2.1.2 Anizotropie plechů	15
2.1.3 Exponent deformačního zpevnění	17
2.1.4 Zásoba plasticity.....	18
3. Technologické zkoušky tvárivosti plechů.....	19
3.1 Zkouška hloubením dle Erichseny.....	19
3.2 Zkouška kalíškovací.....	21
3.3 Zkouška kalíškovací s přidržením příruby podle Gross-Engelhardt.....	22
3.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa	23
3.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici	24
3.6 Zkouška hydraulická	25
4. Nedestruktivní zkoušky plechů	27
5. Fotogrammetrie	28
5.1 Princip fotogrammetrie.....	28
5.2 Rozdělení fotogrammetrie	30
5.3 Aplikace fotogrammetrie	32
5.4 Měřicí systémy v oblasti tváření kovů.....	33
5.4.1 Bezkontaktní optický měřicí systém ARAMIS.....	34
6. Praktická část	36
6.1 Vstupní parametry pro konstrukční návrh přípravku	38
6.1.1 Hydraulický válec.....	38
6.1.2 Rozměry tažníku, tažnice a přidržovače, optický systém.....	40
6.1.3 Upínací deska	41
6.2 Konstrukce přípravku	42
6.2.1 Konstrukční řešení přípravku	42
6.2.2 Analýza napětí a deformací.....	43
6.3 Výroba přípravku.....	48
6.3.1 Frézování	48
6.3.2 Svařování.....	49
6.3.3 Soustružení.....	50

6.3.4	Tepelné zpracování	50
6.3.5	Povrchová úprava a montáž.....	51
6.4	Materiál pro zkoušku přípravku	52
6.5	Test funkčnosti přípravku pro zvolený materiál.....	54
6.6	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	56
7.	Závěr.....	58
8.	Použitá literatura.....	59

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Význam
A	[%]	Tažnost
A_g	[%]	Homogenní tažnost
b	[mm]	Šířka vzorku
C	[MPa]	Koeficient monotónního zpevnění
D	[mm]	Průměr přístřihu
d	[mm]	Průměr nádoby
F	[N]	Zatěžující síla
f	[-]	Anizotropie plechu
F_e	[N]	Síla na mezi kluzu
FLC		Forming limit curve (Křivka mezních deformací)
FLD		Forming limit diagram (Diagram mezních deformací)
F_m	[N]	Maximální síla
$F_{p0,2}$	[N]	Síla na mezi kluzu
h	[m]	Vzdálenost pořízeného snímku
IE	[mm]	Velikost prohloubení
K	[-]	Stupeň tažení
k	[-]	Koeficient zaplnění plochy
L	[mm]	Okamžitá měřená délka
l	[mm]	Délka
m	[-]	Součinitel tažení
n	[-]	Exponent deformačního zpevnění
r	[-]	Součinitel normálové anizotropie
R	[MPa]	Smluvní napětí
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	Průřez
S_o	[mm ²]	Počáteční plocha příčného průřezu
S_u	[mm ²]	Nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení

T	[%]	Přirozený stupeň hlubokotažnosti
v	[mm]	Výška
Z	[%]	Kontrakce
ZP	[MPa]	Zásoba plasticity
α	[-]	Součinitel svarového spoje
ΔL	[mm]	Absolutní prodloužení
ε	[-]	Poměrné prodloužení
σ	[MPa]	Skutečné napětí
φ	[-]	Skutečná (logaritmická) deformace
φ_b	[-]	Deformace ve směru šířky
φ_t	[-]	Deformace ve směru tloušťky

1. Úvod

Zkouška hloubením dle Erichsena je ve své podstatě jednou z nejzákladnějších technologických zkoušek tvařitelnosti tenkých plechů. Do plechu upnutého mezi přidržovač a tažnici proniká indentor ve tvaru koule o průměru 20 mm. Jako kritérium hlubokotažnosti plechu zde bereme velikost prohloubení IE [mm], při kterém dojde ke vzniku trhliny v celé tloušťce zkušební vzorku.

Cílem diplomové práce bylo navržení, výroba a test funkčnosti přípravku pro technologickou zkoušku hloubením dle Erichsena tak, aby pro tento test bylo možné využít nově zakoupený biaxiální hydraulický zkušební stroj a systém pro bezkontaktní analýzu deformace. Oproti standardně prováděnému testu hloubení dle Erichsena, je přidanou hodnotou řešení diplomové práce možnost sledování rozvoje a vzniku mezního stavu deformace v průběhu zkoušky pomocí fotogrammetrické metody.

2. Zkoušky mechanických vlastností plechů

Klíčovou vlastností tenkých plechů určených pro hluboké tažení je jejich tvařitelnost, potažmo zásoba plasticity materiálu. Mezi základní zkoušky mechanických vlastností plechů řadíme zkoušku tahem a zkoušky tvrdosti. Vyhodnocením mechanických zkoušek dostaneme fyzikální veličiny, které charakterizují daný materiál a jeho vhodnost k dané technologii zpracování.

2.1 Statická zkouška tahem

Zkoušku tahem nejčastěji využíváme k hodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Proces zkoušení materiálu spočívá v plynulém zatěžování zkušební tělesa (plechu normalizovaného tvaru a rozměru), obvykle do jeho přetržení. Prvotními výstupními veličinami z tahové zkoušky je závislost síly na prodloužení $F = f(\Delta L)$, kde F [N] je zatěžující síla a ΔL [mm] je absolutní prodloužení zkušební tyče. [1, 5, 7]

2.1.1 Smluvní a skutečný tahový diagram

Ze zkoušky tahem určujeme smluvní vlastnosti. Smluvní, protože jsou vztažené k něčemu, co je smluvně (pevně) dáno a to jsou rozměry zkušební tělesa před zkouškou.

Smluvní vlastnosti stanovené ze statické zkoušky tahem:

- Mez kluzu R_e

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.1)$$

Je napětí, při kterém dochází k prvotním plastickým deformacím.

F_e [N] - síla na mezi kluzu

S_0 [mm²] - počáteční plocha příčného průřezu vzorku

- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.2)$$

Pro materiály s nevýraznou mezí kluzu určujeme její smluvní hodnotu, obvykle to bývá napětí, které je dosaženo při 0,2% plastické deformace. [5,7]

$F_{p0,2}$ [N] - síla na mezi kluzu

S_0 [mm²] - počáteční plocha příčného průřezu vzorku

- Mez pevnosti v tahu R_m

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.3)$$

Je nejvyšší napětí odpovídající největšímu zatížení před přetržením zkušební vzorku.

F_m [N] - maximální síla před přetržením zkušební vzorku

S_0 [mm²] - počáteční plocha příčného průřezu vzorku

- Tažnost A

$$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

Vyjadřuje procentuální prodloužení měřené délky zkušební vzorku po přetržení.

L_0 [mm] – počáteční délka zkušební vzorku

L_u [mm] – konečná délka zkušební vzorku po přetržení

- Kontrakce Z

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

Je největší změna příčného průřezu vzorku po přetržení, vyjadřuje se v procentech původní plochy příčného průřezu.

$S_0 [mm^2]$ - počáteční plocha příčného průřezu vzorku

$S_u [mm^2]$ - nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení [5,7]

K dalším kritériím pro hodnocení plechů kromě výše uvedených, patří hodnoty koeficientu plastické anizotropie (plošné a normálové), exponentu deformačního zpevnění, případně zásoby plasticity.

Pro reálnou představu o chování materiálu je zaveden ke smluvnímu tahovému diagramu ještě diagram skutečný. Místo smluvního napětí zavádíme veličinu skutečného napětí $\sigma = f(\varphi)$, které je dáno podílem působící síly $F [N]$ k okamžité ploše průřezu vzorku $S [mm^2]$. [5,7]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (2.6)$$

Veličina $d\varphi$ je hodnota okamžitého prodloužení daná vztahem:

$$d\varphi = \frac{dl}{l} \quad (2.7)$$

Po integraci:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad [-] \quad (2.8)$$

$L [mm]$ - okamžitá (skutečná) měřená délka

V případě smluvního diagramu vycházíme ze známých vzorců:

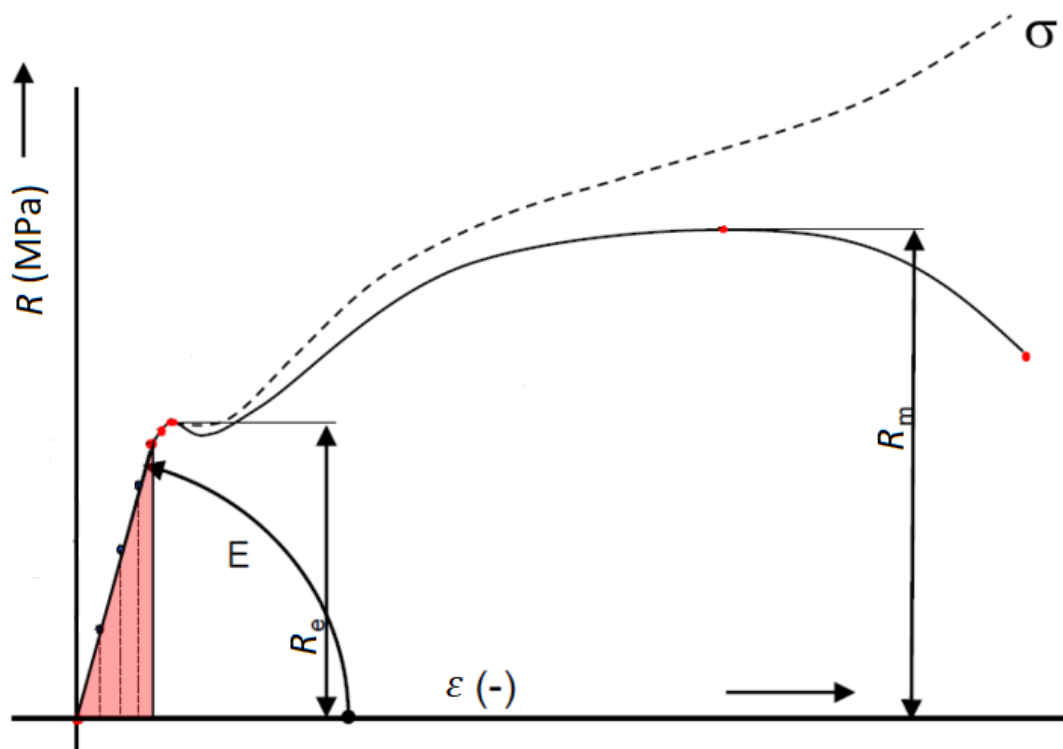
$$R = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [-] \quad (2.10)$$

$$\Delta L = L - L_0 \quad [mm] \quad (2.11)$$

$\varepsilon [-]$ - poměrné prodloužení vzorku

$\Delta L [mm]$ - absolutní prodloužení vzorku [5,7]



Obr. 1 Smluvní a skutečný tahový diagram [13]

2.1.2 Anizotropie plechů

Způsob výroby plechu válcováním způsobuje v materiálu rozdíly pevnostních a plastických vlastností. Tyto vlastnosti se liší v různých směrech vztažených na směr válcování při výrobě plechu a jsou charakterizovány koeficienty plošné a normálové anizotropie. Vzorky jsou nejčastěji odebrány ve směrech 0° , 45° a 90° (dolní index u součinitele r) vzhledem ke směru válcování plechu (obr. 2).

Rozlišujeme tedy anizotropii plastických vlastností v rovině plechu Δr a anizotropii kolmou na rovinu plechu, která je charakterizovaná váženým průměrem součinitele plastické anizotropie r_s , označovaného také jako \bar{r} .

Plastická (normálová) anizotropie je definována jako poměr skutečné deformace šířky ke skutečné deformaci tloušťky. [1, 12]

Součinitel normálové anizotropie r je dán vztahem:

$$r_i = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)} \quad [-] \quad (2.12)$$

Jelikož je měření tloušťky plechů nepřesné a složité, využívá se k výpočtu součinitele normálové anizotropie níže uvedený vztah:

$$r_i = \frac{\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 \cdot b_0}{L_1 \cdot b_1}\right)} \quad [-] \quad (2.13)$$

Pro střední hodnotu normálové anizotropie platí vztah:

$$r_s = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.14)$$

Důležitým ukazatelem je koeficient plošné anizotropie Δr .

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 + r_{90} - 2r_{45}) \quad [-] \quad (2.15)$$

Čím víc se blíží jeho hodnota k nule, tím jsou vlastnosti materiálu ve všech směrech vyrovnané a materiál vhodnější ke hlubokému tažení.

φ_b – skutečná (logaritmická) deformace plechu ve směru šířky

φ_t – skutečná (logaritmická) deformace plechu ve směru tloušťky

b_0 – počáteční šířka vzorku

b_1 – konečná šířka vzorku

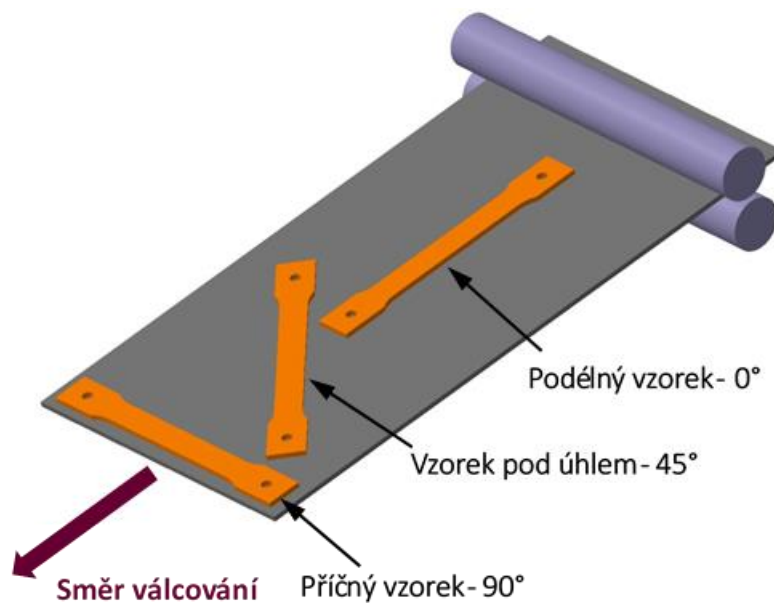
t_0 – počáteční tloušťka vzorku

t_1 – koncová tloušťka vzorku

L_0 – počáteční měřená délka vzorku

L_1 – koncová měřená délka vzorku

r_0, r_{45}, r_{90} – koeficient normálové anizotropie ve směru 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru válcování plechu [12]



Obr. 2 Odběr vzorků pro měření anizotropie plechů

2.1.3 Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění n je důležitým ukazatelem tvařitelnosti, svou hodnotou vyjadřuje schopnost materiálu ke zpevňování během plastické deformace. U materiálů s vysokou hodnotou exponentu deformačního zpevnění nedochází k zeslabování tloušťky v exponovaných místech výlisku, je zde menší pravděpodobnost vzniku trhliny. [1]

Hodnotu n získáme exponenciální aproximací tahového diagramu podle vzorce:

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad (2.16)$$

C [MPa] - koeficient monotónního zpevnění

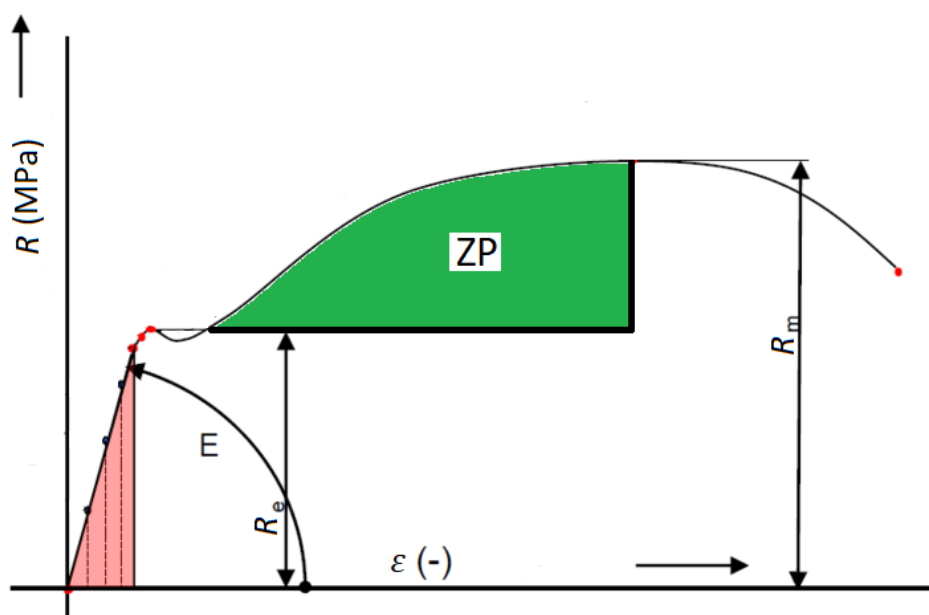
φ [—] - skutečná (logaritmická) deformace

n [—] - exponent deformačního zpevnění [1]

v oblasti plastické deformace v intervalech daných normou ČSN ISO 10275.

2.1.4 Zásoba plasticity

Dalším kritériem pro hodnocení tvářitelností plechu je zásoba plasticity resp. plastičnosti materiálu ZP . Její hodnota v podstatě vyjadřuje množství práce potřebné k přetvoření materiálu v oblasti ohraničené jeho mezí kluzu a mezí pevnosti, je dána obsahem plochy pod křivkou tahového diagramu – obrázek č. 3. [1,14]



Obr. 3 Zásoba plasticity materiálu [13]

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot A_g \quad [MPa] \quad (2.17)$$

k - koeficient zaplnění plochy

A_g - homogenní tažnost

Homogenní tažnost v sobě zahrnuje pouze homogenní plastickou deformaci materiálu, shora je omezena mezí pevnosti R_m materiálu. [14]

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_0} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.18)$$

ΔL_m - prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení

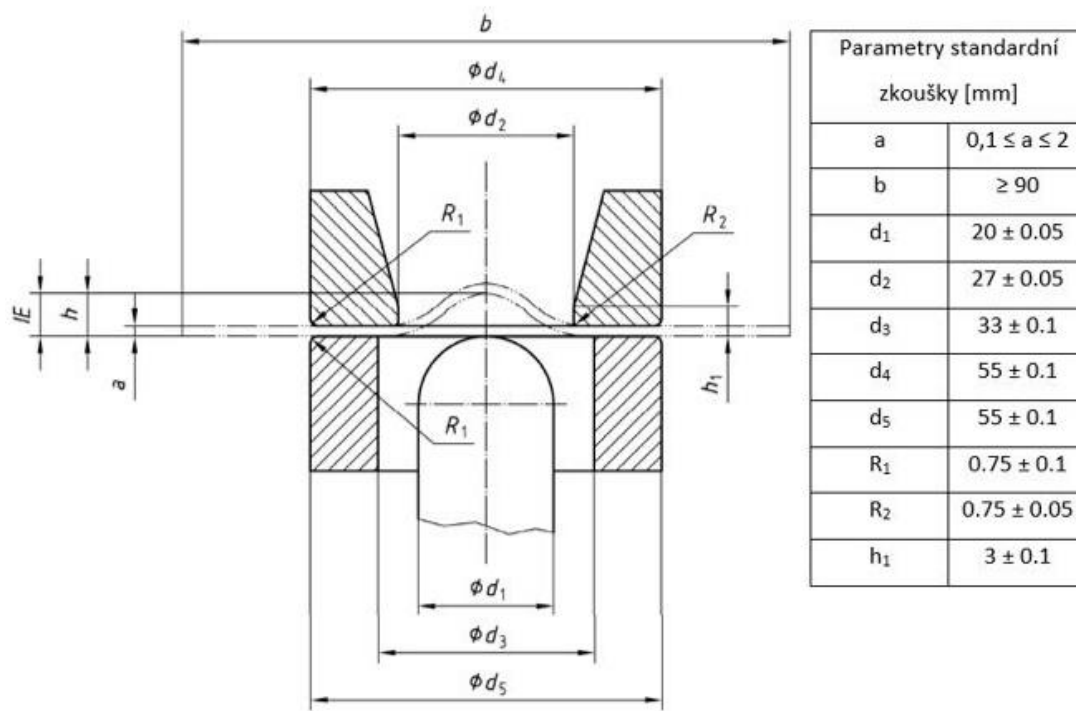
3. Technologické zkoušky tvářitelnosti plechů

Technologické zkoušky vedle základních mechanických zkoušek vlastností materiálů, jako jsou zmíněná zkouška tahem nebo zkoušky tvrdosti, mají za úkol zjistit vhodnost materiálu k určité zpracovatelské činnosti.

Technologické zkoušky tvářitelnosti tedy napodobují napětově - deformační stav pro daný způsob výroby (pro danou technologii tváření) a určují, do jaké míry by mohl být proces zpracování daného materiálu při určených podmínkách úspěšný. [11]

3.1 Zkouška hloubením dle Erichsena

Do zkušebního plechu o rozměrech 90 x 90 mm, který je pevně upevněn do mezikruží mezi přidržovač a tažnici, je vtlačován kulový trn (tažník). Při tom dochází ke hloubení plechu na kulovém vrchlíku za současného vytahování plechu na kuželovém plášti důlku. Princip zkoušky je patrný z obrázku č. 4. [1, 2, 6]

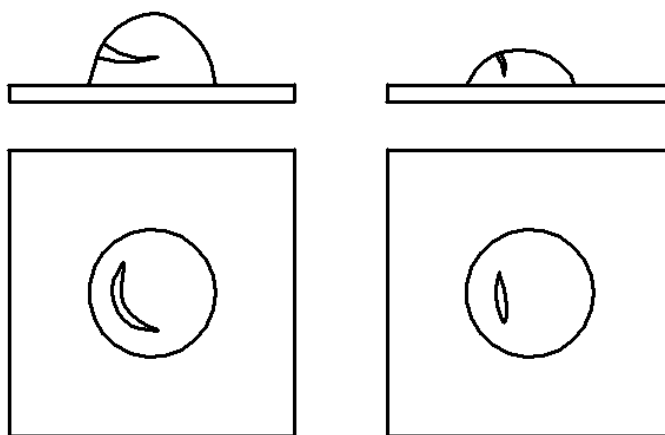


Obr. 4 Schéma zkoušky hloubením dle Erichsena [6]

Dle normy ČSN ISO 20482 označujeme tloušťku plechu malým písmenem a [mm]. Prohloubení plechu je označováno parametrem IE [mm]

Kritériem vhodnosti plechu ke hlubokému tažení je hloubka IE , při které dojde k narušení plechu. Narušením plechu rozumíme vznik viditelné trhliny v celé tloušťce zkoušeného materiálu. Tato míra není závislá jen na typu materiálu, ale také na tloušťce plechu.

Po zkoušce hodnotíme také směr trhlín (obr. 5), podle kterého můžeme částečně hodnotit anizotropii materiálu, dále posuzujeme hrubost povrchu důlku, která je ukazatelem velikosti zrna plechu. [1, 2, 6]



Obr. 5 Typický tvar vzorku pro plech vhodný ke hlubokému tažení (vlevo), nevyhovující vzorek (vpravo) [1]

Výhodou Erichsenovy zkoušky hloubením je její jednoduchost, rychlost a nenáročnost přípravy zkušebních vzorků. Nevýhodou je rozptyl výsledků v rámci zkoušení jedné jakosti materiálu při ručním ovládání tažníku na čistě mechanickém přípravku z důvodu nerovnoměrné rychlosti zatěžování vzorku. Tento problém odpadá na hydraulickém zařízení s plynulou regulací posuvu tažníku. [1, 2]

Tažník by měl být leštěný, na jeho povrch je před samotnou zkouškou aplikováno mazivo z důvodu omezení tření mezi ním a zkušebním vzorkem. Tažnice a přidržovač jsou na kontaktních hranách zaobleny – zaoblení o poloměru $R_1 = 0,75 \pm 0,1$ [mm] a $R_2 = 0,75 \pm 0,05$ [mm] (obr. 4). [1, 6]

3.2 Zkouška kalíškovací

Kalíškovací zkouška (též AEG nebo Schmiedtova) má za cíl navodit stejné poměry, jako poměry, které vznikají při tažení nádoby rotačního tvaru. [1, 2]

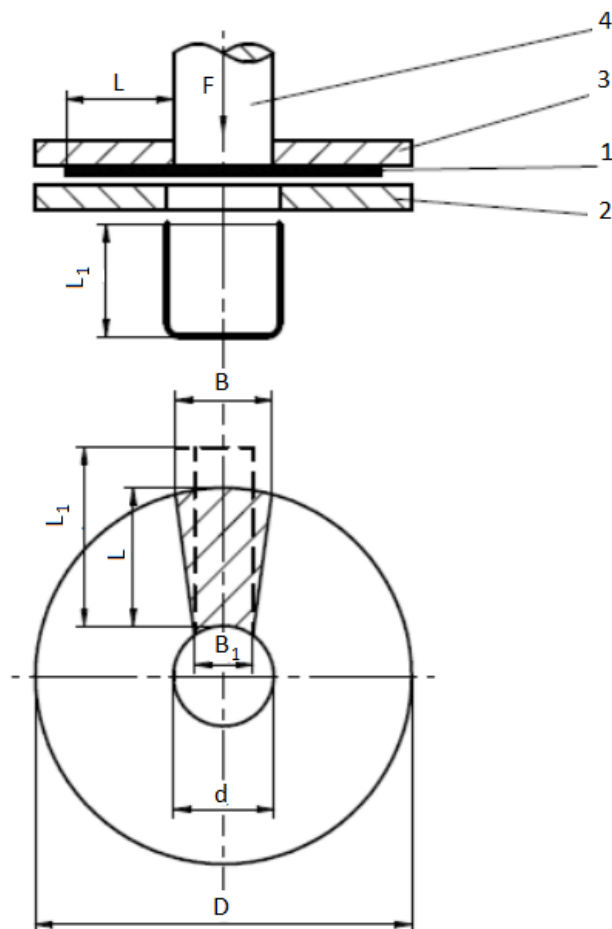
Cílem zkoušky je nalézt maximální hodnotu stupně tažení K .

$$K = \frac{D}{d} \quad [-] \quad (3.1)$$

Stupeň tažení K je převrácená hodnota součinitele tažení m

$$m = \frac{1}{K} = \frac{d}{D} \quad [-] \quad (3.2)$$

kde D je průměr výstřižku a d je průměr vytažené nádoby. [1, 2]



Obr. 6 Princip kalíškovací zkoušky

1 – přístřih plechu 2 - tažnice 3- přidržovač 4- tažník [1]

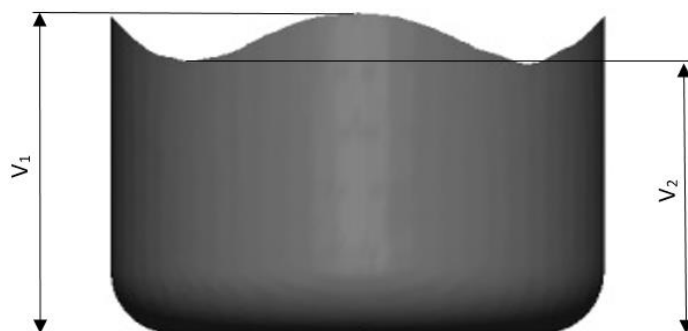
Tato technologická zkouška je poměrně zdlouhavá a zároveň náročná na přípravu zkušebních vzorků. Cílem zkoušky je najít maximální průměr přístřihu D , ze kterého lze získat válcový kalíšek bez porušení. Zkoušku tedy opakujeme za současného zvyšování průměru přístřihu plechu $D = d + 2L$ do doby, kdy je proces tažení úspěšný (výtažek bez trhliny). Válcový tažník o průměru $d = 50$ mm proniká do hloubky $L_1 > L$. [1, 2]

Výhodou kalíškovací zkoušky je skutečnost, že umožňuje hodnocení anizotropie mechanických vlastností plechů, která se projevuje zvlněným okrajem výtažku – tzv. cípatostí.

Přestože zkouška není normalizovaná, jejího principu je využíváno ke zjišťování anizotropie hliníkových plechů (ČSN 42 0409) výpočtem hodnoty f .

$$f = \frac{v_1 - v_2}{v_2} \cdot 100 \quad [-] \quad (3.3)$$

Kde v_1 je střední výška kalíšku k hornímu okraji cípu a v_2 střední výška kalíšku k spodnímu okraji cípu na vrchní hraně kalíšku viz obr. 7. [1, 2]



Obr. 7 Cípatost výtažku

3.3 Zkouška kalíškovací s přidržením příruby podle Gross-Engelhardta

Kalíškovací zkouška podle Gross-Engelhardta, také označovaná jako zkouška TZP (Tiefziehprüfung) má dvě fáze. V první fázi je z pásu zkušebního plechu o šířce 58 mm vystřižnuta rondel o průměru 52mm.

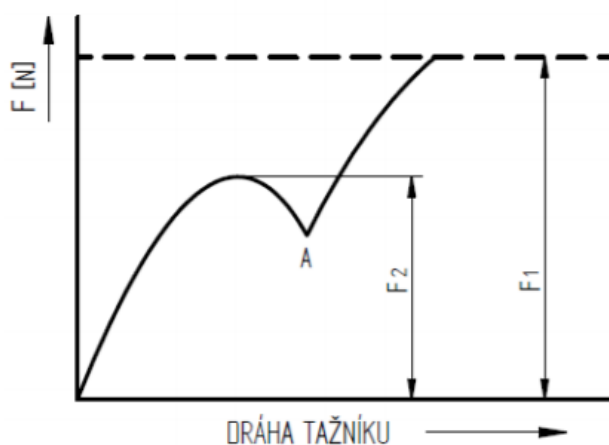
Ve druhé fázi zkoušky probíhá tažení s přidržovačem do překročení tažné síly F_2 . Po překročení síly F_2 umožňuje přístroj zvýšit sevření vzorku za pomoci sekundárního

přidržovače, čímž je znemožněn jeho pohyb. Následuje zvýšení tažné síly na sílu F_1 (F_{\max}), při které dojde k utržení dna kelímku. Průběh sil je patrný z obrázku č. 8. [1, 2]

Z výsledných parametrů zkoušky určíme tzv. přirozený stupeň hlubokotažnosti T .

$$T = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

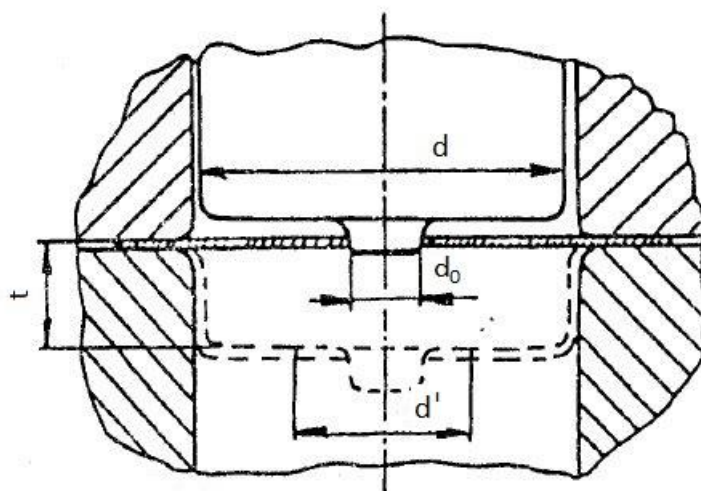
U materiálů vhodných pro hluboké tažení je hodnota T větší, než 40 %. [1, 2]



Obr. 8 Průběh síly při Gross-Engelhardtově zkoušce [1]

3.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Polotovarem pro tuto zkoušku je kruhový nebo čtvercový nástřih s otvorem uprostřed.



Obr. 9 Schéma zkoušky podle Siebela a Pompa [1]

Přístřih plechu s otvorem o průměru $d_0 = d/3$ je přidržován přidržovačem a tažen válcovým tažníkem do okamžiku vzniku prvních trhlin na rozšiřujícím se otvoru uprostřed zkušebního vzorku. [1, 2]

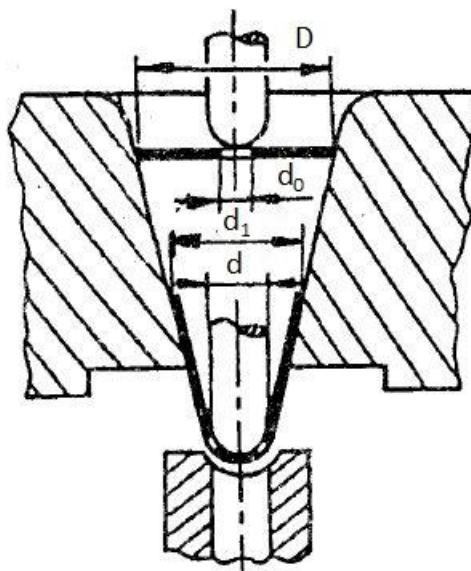
Zkouška není normalizovaná, mírou vhodnosti plechu pro hluboké tažení je číslo q .

$$q = \frac{t \cdot (d'_{max} - d'_{min})^2}{4 \cdot d_0 (d'_{max} - d'_{min})} \quad [-] \quad (3.5)$$

Koeficient q v sobě zahrnuje vliv prohloubení plechu, rozšíření otvoru a vliv anizotropie. Čím větší vznikne prohloubení t a rozšíření otvoru d' a čím menší je plošná anizotropie, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení. [1, 2]

3.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici

Zkouška tažením v kuželové tažnici je nazývána také jako Fukuiho zkouška. Technická norma pro tuto zkoušku existuje v Japonsku. Schéma zkoušky je patrné z obrázku č. 10. [1, 2]



Obr. 10 Fukuiho zkouška [1]

Zkouška spočívá v tažení kruhového rondelu s vyvrtaným otvorem nebo bez něj tažníkem bez přidržovače do okamžiku porušení zkušební vzorku. Průměr přístřihu D je obvykle volen $D = 6d_0$, průměr tažníku $d = 2d_0$. [1, 2]

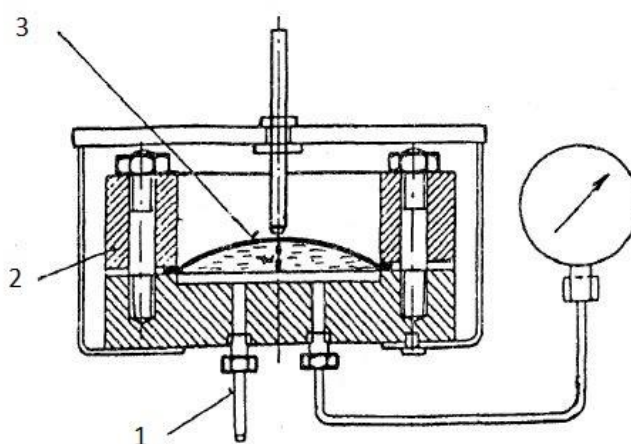
Kritériem hlubokotažnosti plechu Fukuiho zkoušky je součinitel tažení m_F .

$$m_F = \frac{d_1}{D} \quad [-] \quad (3.6)$$

Kde D je průměr kruhového přístřihu a d_1 je nejvyšší průměr kuželového výtažku v okamžiku vzniku první trhliny. [1, 2]

3.6 Zkouška hydraulická

Hydraulická (Tomlenova) zkouška je v porovnání se zkouškou podle Erichsena objektivnější. Nevýhodou je složitější zařízení, jehož schéma je zobrazeno na obrázku č. 11.



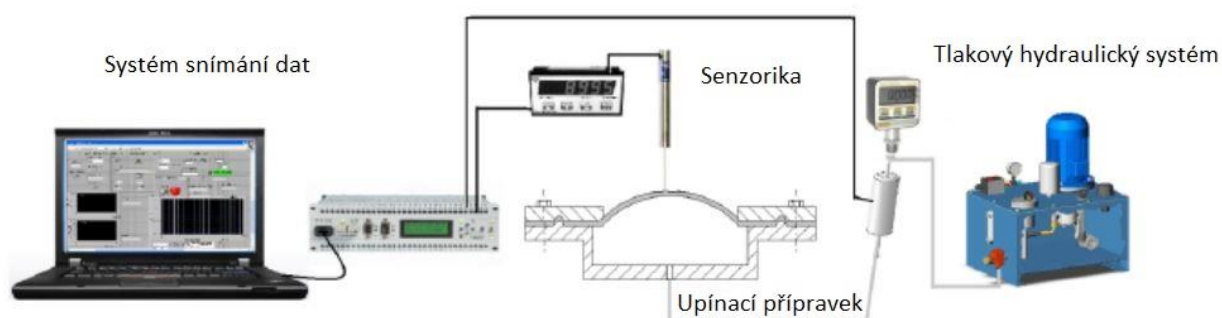
Obr. 11 Schéma hydraulické zkoušky

1 - přívod hydraulické kapaliny, 2 – přidržovač, 3 - zkušební vzorek plechu [1]

Pod zkušební vzorek, který je upnutý do přípravku, je vháněna tlaková kapalina. Zvyšováním tlaku v zařízení dochází k postupné deformaci plechu. Hodnocený parametr t je hodnota prohloubení zkušební vzorku v okamžiku jeho porušení. Po zkoušce dále posuzujeme tvar trhliny a celkový vzhled zkušební vzorku. [1, 2]

Hydraulická zkouška se v dnešní době už prakticky nepoužívá, je nahrazena tzv. Bulge testem, kde je deformace snímána fotogrammetricky. Výhodou Bulge testu je možnost sestavení křivky zpevnění materiálu.

Princip Bulge testu je obdobný hydraulické zkoušce. Pod zkušební vzorek upnutý do speciálního přípravku je vháněna tlaková kapalina. Při postupném zvyšování pracovního tlaku a deformaci vzorku dochází zároveň k jeho snímání fotogrammetrickou metodou. Po dokončení testu dochází k jeho vyhodnocení a sestavení křivky zpevnění. [15]



Obr. 12 Bulge test schematicky [15]

4. Nedestruktivní zkoušky plechů

Mezi nedestruktivní metody zkoušení materiálu řadíme zkoušku rentgenovým zářením, zkoušku ultrazvukem, magnetickou metodu, metodu kapilární a v neposlední řadě i zkoušky tvrdosti, které sice svojí podstatou svým způsobem narušují integritu materiálu, ale jsou rovněž řazeny mezi nedestruktivní metody zkoušení materiálů a mají oproti předchozím vyjmenovaným v oblasti plošného tváření větší význam.

Tvrдост je mechanická vlastnost, je definována jako odpor proti vniku cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti jsou rychlé a levné. Další jejich výhodou je, že jsou proveditelné na hotových výrobcích. Samotnou tvrdost nelze jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, její hodnota závisí na zkušebních podmínkách, které jsou odlišné pro jednotlivé metody.

Zkoušky tvrdosti využíváme k orientačnímu posouzení mechanických vlastností materiálu. Nejčastěji jsou používány statické metody vnikací zkoušky, které spočívají v pozvolném vtlačování tělesa (indentoru) do povrchu materiálu. K měření tvrdosti tenkých hlubokotažných plechů je nejčastěji používána Vickersova metoda. U tlustých plechů je možné použít metodu měření podle Brinella. Tloušťka plechu musí být minimálně osminásobně větší než je hloubka vpichu indentoru. [1, 5, 10]

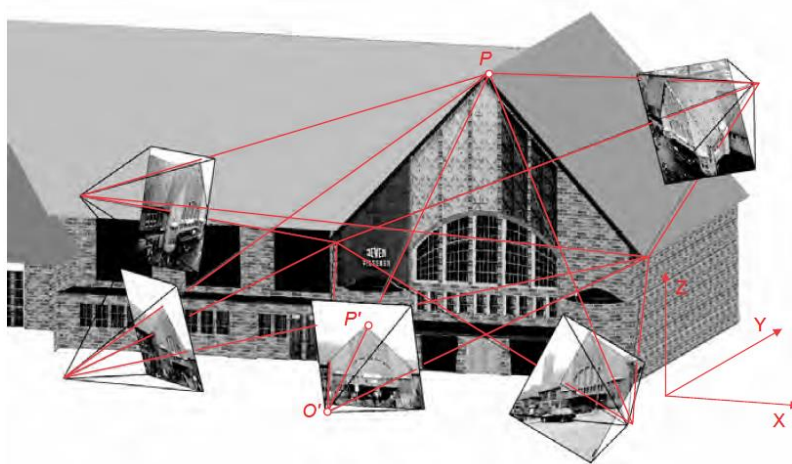
5. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se zabývá měřením tvaru a polohy objektu, který je zachycen na jednom nebo více snímcích. Primárním účelem fotogrammetrie je trojrozměrná rekonstrukce objektu. Její princip můžeme uplatnit všude. V zásadě stačí požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit.

Historický vývoj fotogrammetrie sahá do 30. a 40. let 19. století a souvisí s vynálezem fotografie. Za vynálezce fotogrammetrie (50. léta 19. století) jsou považováni francouzský důstojník, vědec a kartograf Aimé Laussedat a německý inženýr Albrecht Meydenbauer. Jako první se fotogrammetrie využívala k měření budov (fasád budov), následně pro tvorbu topografických map. [3]

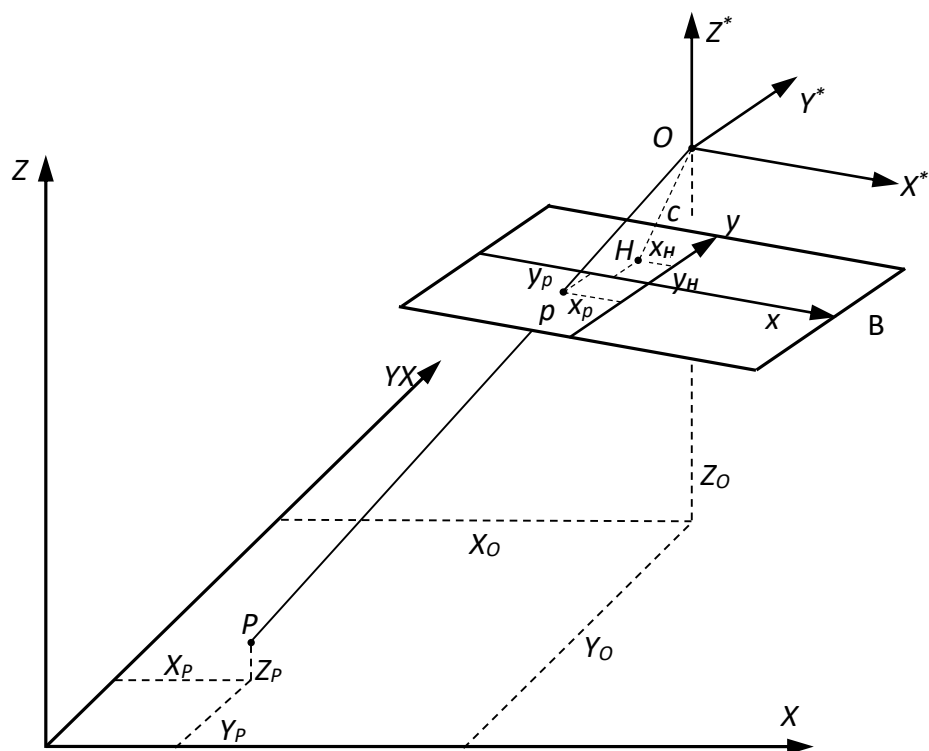
5.1 Princip fotogrammetrie

Fotogrammetrie využívá k analýze trojrozměrných objektů jako základní matematický model princip centrální projekce. Tvar a poloha objektu jsou určeny rekonstrukcí svazků paprsků. Pro každý obrazový bod P' , spolu s odpovídajícím středem perspektivy O' je dán prostorový směr paprsku k odpovídajícímu bodu P . V případě, že známe zobrazovací parametry fotoaparátu, jeho umístění v prostoru, může být definován každý bod (paprsek) v prostoru. K tomu, abychom odhadli bod v prostoru, potřebujeme u stereografie 2 snímky, u více snímkových metod fotogrammetrie je počet snímků prakticky neomezený. [3]



Obr. 13 Princip centrální projekce [3]

K základnímu popisu projekce objektu na rovinu snímku zavádíme tzv. model kamery. Fotogrammetrie využívá principů paprskové optiky, kde měřicí bod $P (X_P, Y_P, Z_P)$, jeho obraz $p (x_p, y_p)$ v rovině snímku B a střed projekce $O (X_O, Y_O, Z_O)$ leží na jedné projekční přímce. Popsaná metoda zobrazení je patrná z obrázku č. 14. [4]



Obr. 14 Matematický základ fotogrammetrie – model kamery [4]

B	rovinu snímku
c	ohnisková vzdálenost
x, y	souřadný systém snímku
x_H, y_H	souřadnice ohniska v rovině snímku
x_P, y_P	souřadnice měřeného bodu P promítnutého do roviny snímku
X, Y, Z	souřadný systém objektu
X^*, Y^*, Z^*	pomocný souřadný systém
X_O, Y_O, Z_O	souřadnice středu promítání v souřadném systému objektu
X_P, Y_P, Z_P	souřadnice měřicího bodu P v souřadném systému objektu [4]

Vztah mezi souřadnicemi bodu P v souřadném systému objektu a souřadném systému snímku lze vyjádřit rovnicemi: [4]

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_p^*} \begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

kde:

$$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

X_p^*, Y_p^*, Z_p^* souřadnice bodu P v pomocném souřadném systému

dx, dy zkreslení objektivu

R matice rotace [4]

Parametry vnitřní orientace snímku jsou ohnisková vzdálenost c , souřadnice ohniska (x_H, y_H) a koeficienty popisující zkreslení objektivu (dx, dy) . Parametry vnější orientace kamery jsou souřadnice středu promítání (X_0, Y_0, Z_0) a matice rotace R , které závisejí na poloze kamery v globálním souřadném systému. [4]

Matice R je ortogonální maticí rotace a lze ji vyjádřit tímto tvarem: [4]

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.2 Rozdělení fotogrammetrie

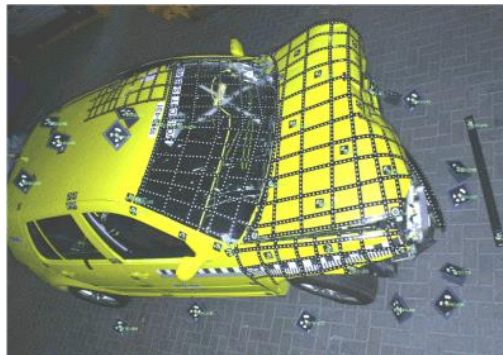
Fotogrammetrie se zabývá širokou škálou měření pořízených fotografií. Rozlišujeme fotogrammetrii pozemní, leteckou a blízkou. Dále můžeme fotogrammetrii dělit podle způsobu aplikace (automobilový, letecký průmysl, stavebnictví). Svoje zastoupení má v různých vědních oborech. [3]

Fotogrammetrie může být rozdělena podle několika kritérií:

- Podle místa a vzdálenosti pořízeného snímku
 - Satelitní – $h > 200$ km – zpracování satelitních snímků
 - Letecká - $h > 300$ m – zpracování leteckých snímků
 - Pozemní - měření z pevně stanoveného místa na povrchu země
 - Blízká (close range) – $h < 300$ m
 - Makro – zpracování snímků z mikroskopu
- Podle počtu měřených snímků
 - Jedno-snímková fotogrammetrie
 - Stereo fotogrammetrie
 - Více-snímková fotogrammetrie [3]
- Podle způsobu pořízení a vyhodnocení snímku
 - Snímky pořízené na měřícím stole
 - Analogová fotogrammetrie
 - Analytická fotogrammetrie
 - Digitální fotogrammetrie
 - Video fotogrammetrie
 - Panoramatická fotogrammetrie
 - Liniová fotogrammetrie
- Podle časové dostupnosti vyhodnocení snímků
 - Real-time – záznam a měření dokončené v určitém časovém úseku příslušném pro danou aplikaci
 - Off-line – sekvenční, digitální záznam obrazu, časově oddělené snímání a vyhodnocení snímku
 - On-line – zároveň probíhající snímání a vyhodnocení snímku, digitální záznam, kamery propojeny s počítačem [3]

5.3 Aplikace fotogrammetrie

- Strojírenství
 - Kontrola výroby
 - Optické měřicí systémy
 - Analýza zkoušek bezpečnosti vozidel
 - Řízení a kalibrace robotů
 - Měření přípravků
 - Kontrola montáže
 - Prostorové simulace [3]



Obr. 15 Aplikace fotogrammetrie v automobilovém průmyslu - nárazové testy vozidel [3]

- Stavebnictví, archeologie
 - Měření a dokumentace budov
 - Měření fasád
 - Rekonstrukce poškozených budov
 - 3D modely měst
 - Měření potrubí a tunelů [3]



Obr. 16 Aplikace fotogrammetrie ve stavebnictví [3]

- Lékařství a fyziologie
 - Stomatologie (měření zubů)
 - Deformace páteře
 - Plastická chirurgie
 - Analýza pohybu a ergonomie
 - Mikroskopická analýza

- Forenzní analýza, kriminalistika
 - Záznam nehody
 - Analýza místa trestného činu
 - Měření osob

- Přírodní vědy
 - Analýza proudění kapalin
 - Topografie vln
 - Růst krystalu [3]

5.4 Měřicí systémy v oblasti tváření kovů

Jak je patrné z předchozí kapitoly, fotogrammetrie má široké využití v různých oblastech vědy a průmyslu. Její principy pronikly i do strojírenství, kde se optických metod využívá ke zrychlení, zkvalitnění a zlevnění výroby (příprava výroby, kontrola, výroba prototypů). Optických systému ve strojírenství využíváme k měření rozměrových veličin, což poslouží při převodu předmětů do digitální podoby a tvorbě CAD modelů. Pomocí měření kinematických veličin můžeme odvodit stavy napjatosti, deformační chování materiálů a zjistit pohybové charakteristiky objektů. Neustálé nároky na vývoj a snižování nákladů v automobilovém průmyslu způsobují, že inovativní metody získávají na stále větší důležitosti. [8, 9]

V oblasti tváření kovů jsou nejčastěji využívány optické systémy PONTOS, ARGUS a ARAMIS. Systém ATOS umožňuje 3D skenování ploch a jejich převod do 3D CAD systémů. Tyto systémy napomáhají při dimenzování součástek a při optimalizaci tvářecích procesů.

5.4.1 Bezkontaktní optický měřicí systém ARAMIS

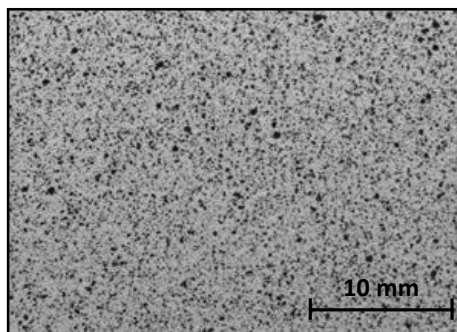
Jedním z významných zástupců v oblasti optických měřicích systémů je systém Aramis od firmy GOM. Tento systém nabízí unikátní řešení, s jehož pomocí lze bezkontaktně snímat data o 3D povrchu, objemu a deformacích tam, kde by jinak bylo nutno použít velké množství tradičních měřicích přístrojů (tenzometrů, extenzometrů). [8]



Obr. 17 Optický měřicí systém Aramis [8]

Aramis, podobně jako systém Pontos využívá principu stereo fotogrammetrie, tj. snímání objektu pomocí 2 kamer. Princip samotného měření spočívá v nanesení kontrastního vzorku (patternu) na povrch zkoumaného objektu. Software si pak měřenou oblast rozdělí na základě stupňů šedi (poměr bílých a černých pixelů) do menších podoblastí. Následně tyto podoblasti sleduje danou frekvencí snímání v zatíženém stavu (v průběhu zkoušky). Frekvence snímání je nastavitelná a závisí na kapacitě dostupného úložiště dat. [8, 9]

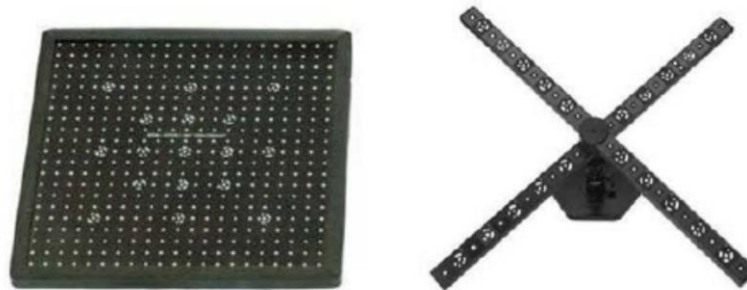
Nejčastěji se používá metoda nanesení bílého podkladu formou nástřiku, po zaschnutí se nanáší druhá vrstva černé barvy. [9]



Obr. 18 Ručně nanesený pattern [9]

Před měřením je třeba provést kalibraci systému pomocí kalibrační destičky. Velikost kalibrační destičky se řídí velikostí sledovaného objektu a požadované přesnosti měření.

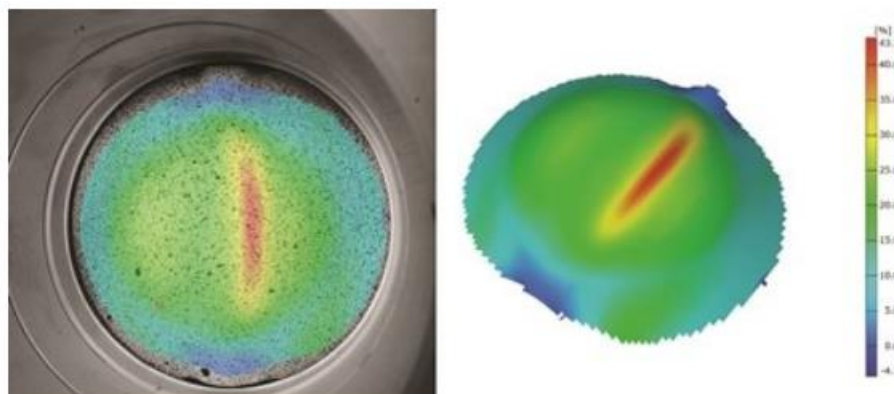
Na kalibrační destičce je znázorněno množství jedinečných kódovaných bodů, jejichž poloha a vzdálenosti jsou známy. Z pořízených snímků kalibrační destičky z různých pohledů vypočítává systém měřící objem a chybu měření. [8, 9]



Obr. 19 Kalibrační destička (vlevo) a kalibrační kříž [9]

Systém Aramis můžeme využít v procesu měření a tvorby křivek mezních deformací (FLC). Křivka FLC je hraniční křivkou diagramu FLD. Ten obsahuje informace o hlavních a vedlejších napětích analyzovaných míst výlisku. Křivku mezních deformací využíváme pro posouzení tvařitelnosti materiálu na základě výsledků numerické simulace, případně na základě měření deformací na výlisku. [8]

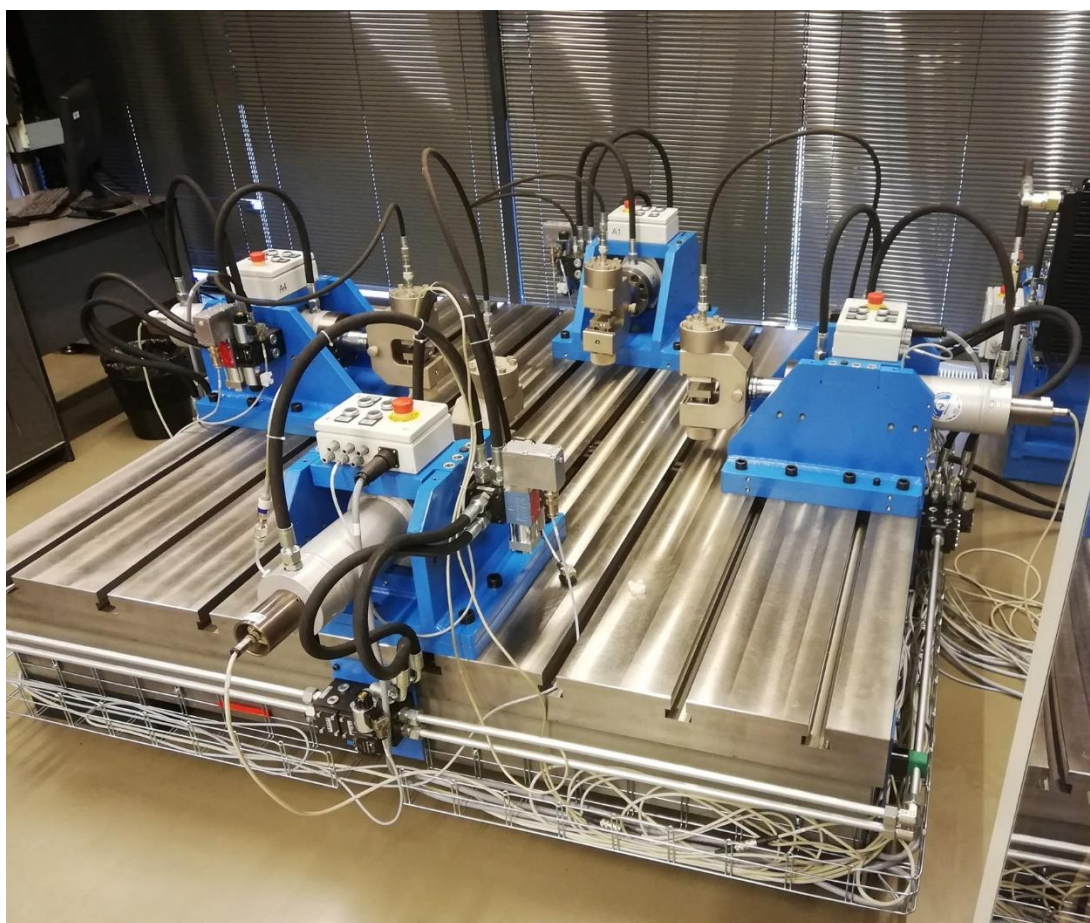
V případě, že na některých místech výlisku stav deformace převyšuje křivku FLC, je potřeba navrhnout proces tváření jiným, vhodnějším způsobem (změna materiálu, úprava síly přidržovače...).



Obr. 20 Analýza deformace plechu systémem Aramis [8]

6. Praktická část

Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci zakoupila nový optický měřicí systém Mercury RT od firmy Sobriety s.r.o., který umožňuje bezkontaktní snímání deformace v průběhu procesu tváření a zařízení pro biaxiální testy se čtyřmi nezávisle říditelnými hydraulickými válci (obr. 21). Z tohoto důvodu byla zadána diplomová práce s cílem vytvořit návrh a konstrukci přípravku pro zkoušku hloubením podle Erichsena, vhodného pro bezkontaktní snímání deformace v průběhu samotné zkoušky. Ve druhé fázi byl přípravek vyroben a otestován.



Obr. 21 Zařízení pro biaxiální zkoušení plechů

Hydraulické válce, umístěné na masivním upínacím stole s T drážkami o hmotnosti převyšující 4 tuny jsou opatřené elektronickým řídicím systémem s možností plynulé regulace a snímání zatěžovací síly a posuvu pístnice. Válce je možno ovládat nezávisle, buďto manuálně pomocí ovládacího panelu nebo pomocí řídicího počítače.

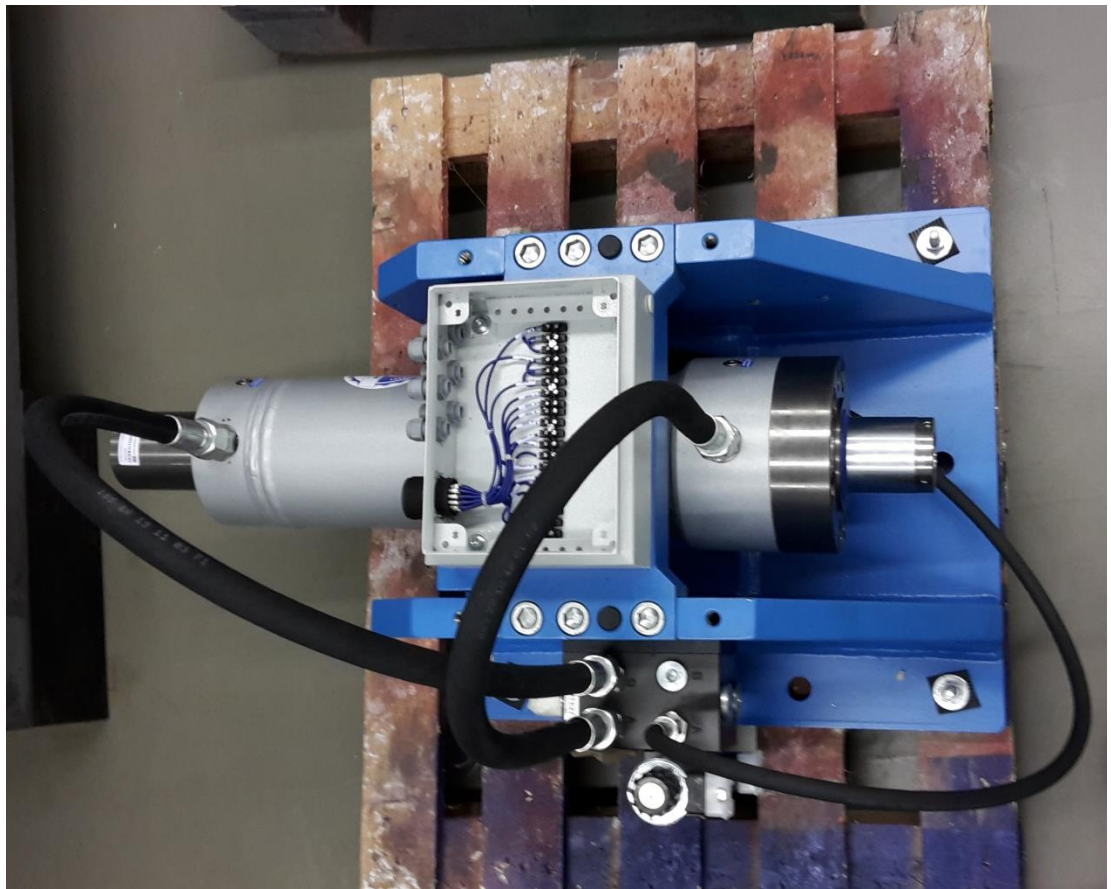
Jednotlivé kroky řešení diplomové práce lze charakterizovat těmito body:

- Analýza zástavbových rozměrů biaxiálního zařízení
 - Analýza rozměrů hydraulického válce a vzdálenosti osy pístnice od roviny upínacího stolu
 - Analýza rozměrů upínacího stolu
- Analýza zástavbových rozměrů optického systému
- Analýza normalizovaných rozměrů tažnice, tažníku a přídržovače
 - Norma pro zkoušku podle Erichsena
- Návrh a konstrukce přípravku
 - Konstrukce
 - Materiál
 - Normalizované součásti
- Pevnostní výpočet
 - Pevnostní analýza svařence (DS SolidWorks)
 - Výpočet napětí ve svarech
 - Výpočet napětí ve vodících tyčích
- Výroba přípravku
 - Obrábění
 - Frézování
 - Soustružení
 - Vrtání
 - Svařování
 - Příprava svarových ploch
 - Povrchová úprava
 - Montáž
 - Lícování rozměrů
- Test funkčnosti

6.1 Vstupní parametry pro konstrukční návrh přípravku

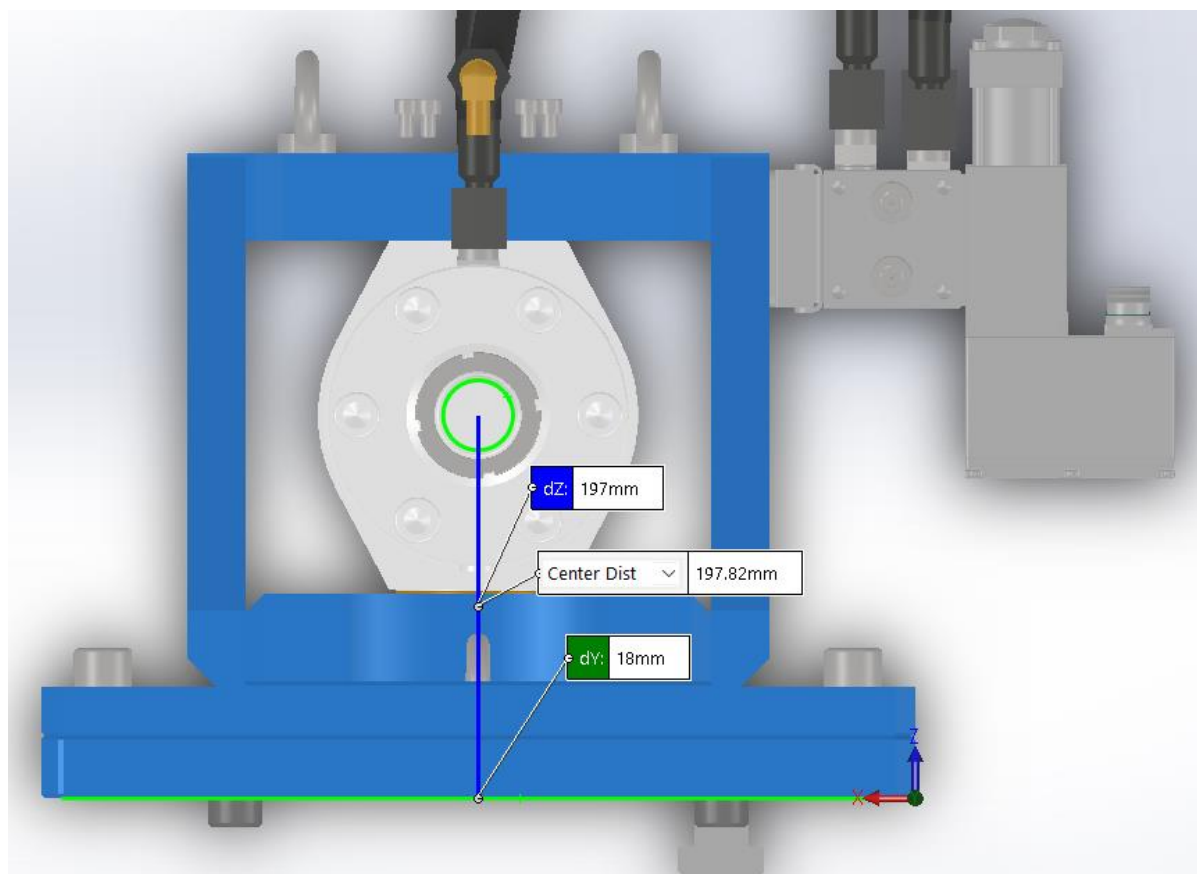
6.1.1 Hydraulický válec

Pro pohon přípravku byly určeny hydraulické válce od firmy Häenchen (obr. 22) s maximální zatěžovací silou 100 kN a zdvihem o hodnotě 280 mm.

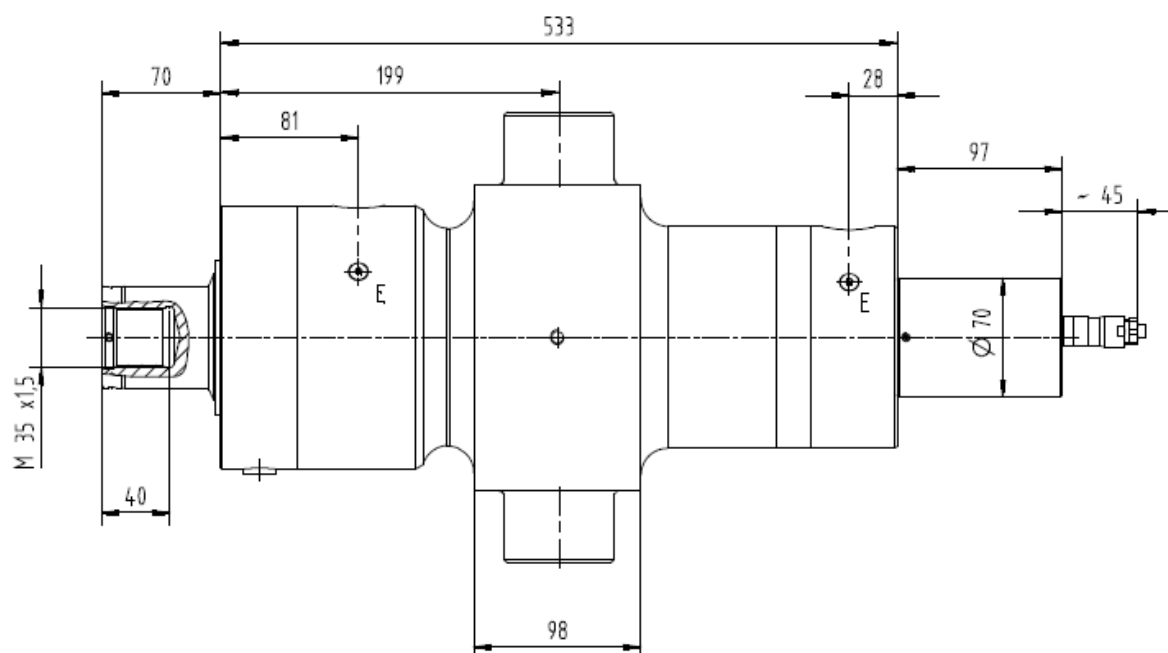


Obr. 22 Hydraulický válec Häenchen

Důležitými vstupními parametry hydraulického válce pro konstrukci přípravku byly nejmenší osová vzdálenost od spodní hrany základní desky (od roviny stolu) $dZ = 197 \text{ mm}$ (obr. 23), dále zdvih válce $z = 280 \text{ mm}$ a rozměry koncové části pístnice – závit $M 35 \times 1,5$ o délce 40 mm (obr. 24).



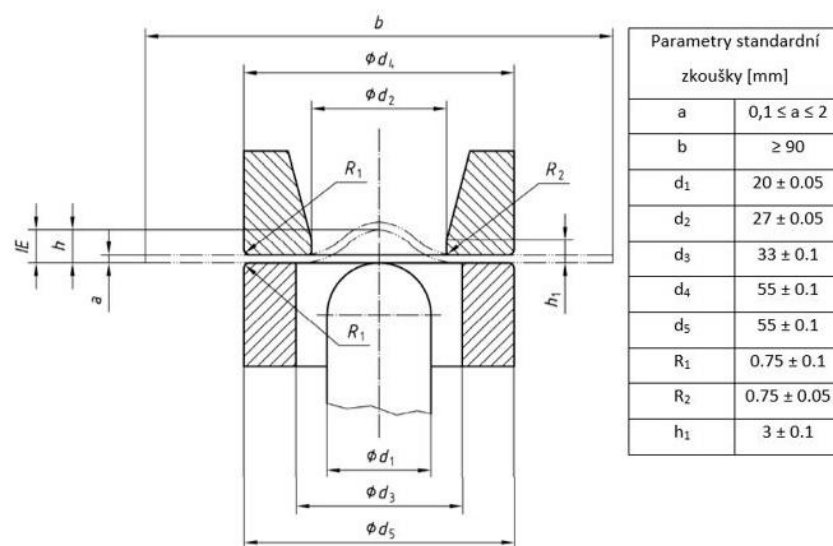
Obr. 23 Analýza osové vzdálenosti od roviny stolu



Obr. 24 Zástavbové rozměry hydraulického válce

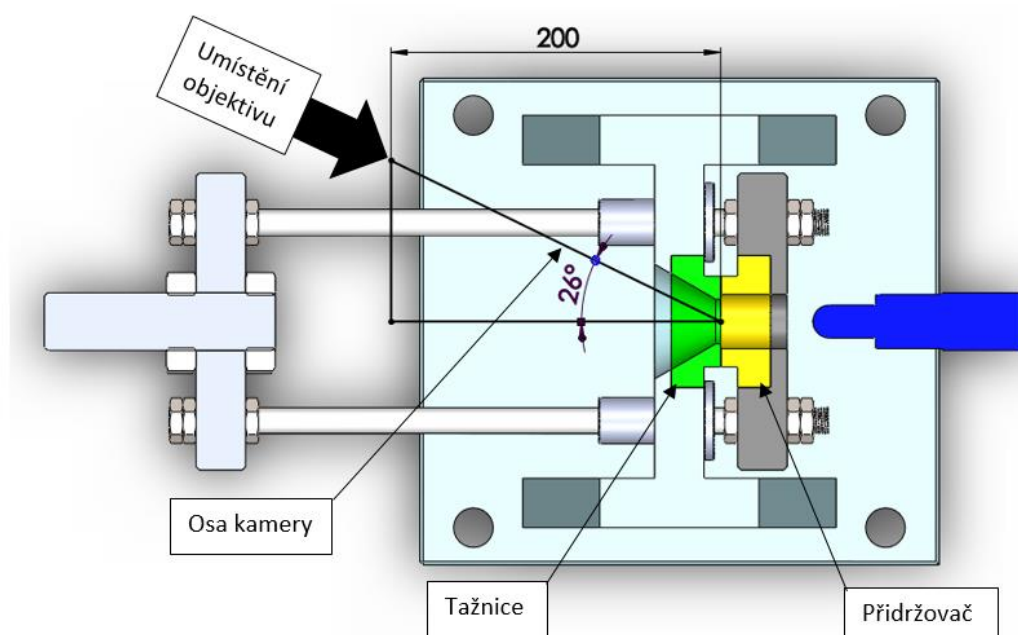
6.1.2 Rozměry tažníku, tažnice a přidržovače, optický systém

Rozměry funkčních ploch přípravku jsou normalizovány dle normy ČSN ISO 20482 - obr. 25. Tažník a tažnice byly opatřeny osazením z důvodu snadnější montáže do těla přípravku (obr. 26).



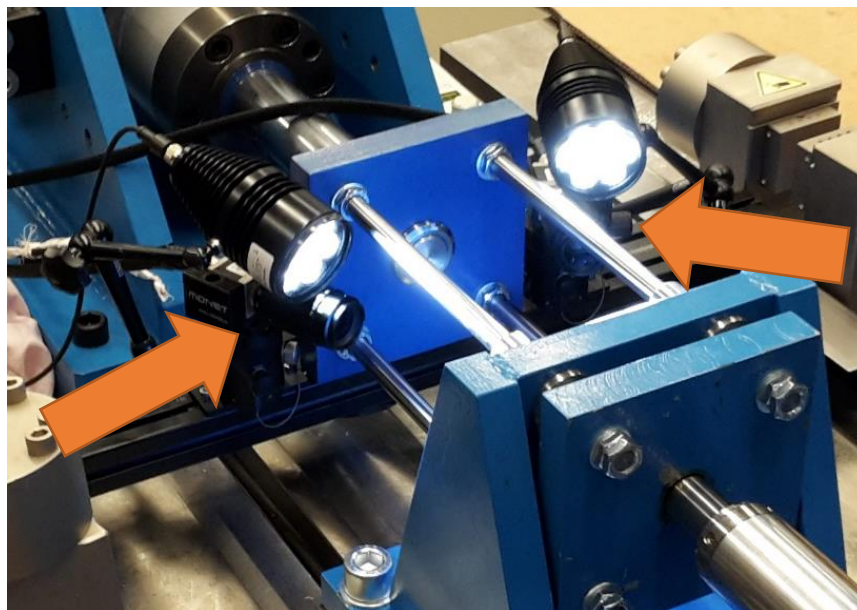
Obr. 25 Normalizované rozměry nástrojů [6]

Kvůli předepsanému zornému úhlu (26°) a vzdálenosti kamer (200 mm) (obr. 26), byly tělo svařence a tažnice opatřeny vnitřním úkosem, tak aby bylo možno snímat deformaci vzorku v průběhu zkoušky.



Obr. 26 Konstrukční uspořádání pro zástavbu optického systému (horní pohled)

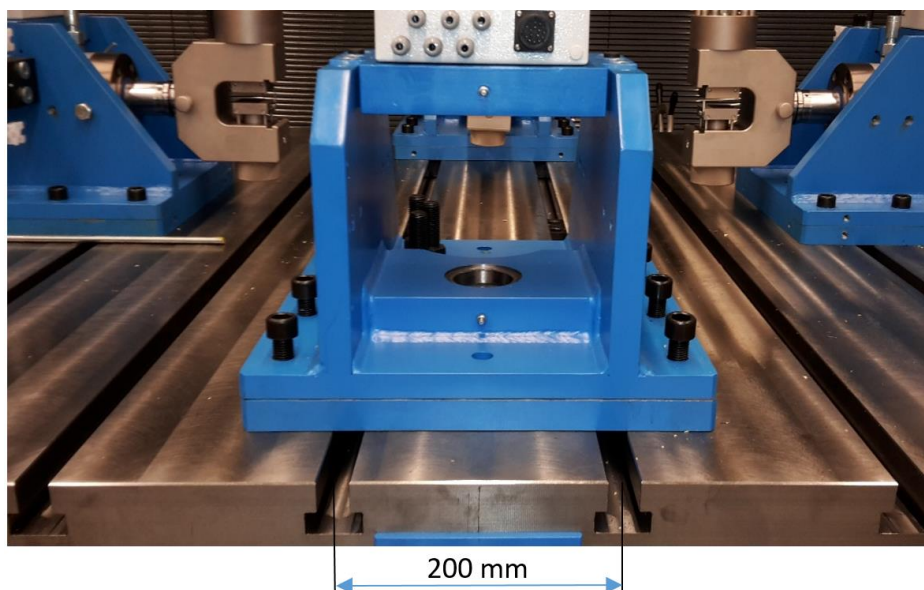
Následné fyzické umístění optického systému v průběhu zkoušení je patrné z obr. 27. Umístění kamery je označeno červenými šipkami.



Obr. 27 Umístění kamer

6.1.3 Upínací deska

Hlavní rozměry upínací desky (2000 x 2000 mm) nebyly limitujícím parametrem pro konstrukci přípravku, důležitá je osová vzdálenost T-drážek, která je rovna 200 mm, patrně z obr. 28.



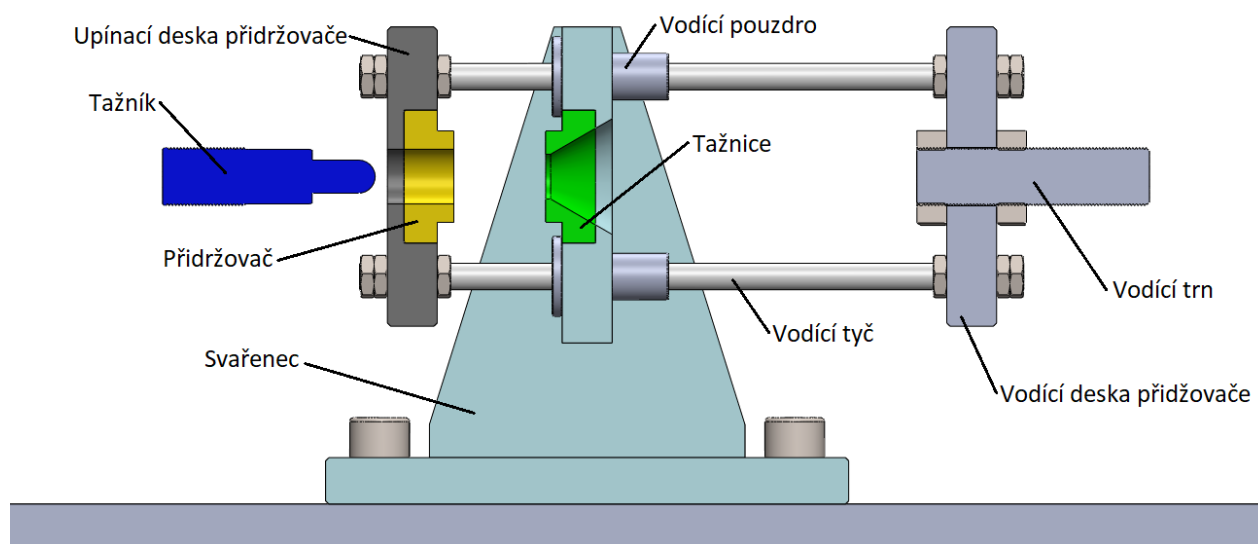
Obr. 28 Upínací deska stolu

6.2 Konstrukce přípravku

Při konstrukci přípravku byly brány v úvahu vstupní parametry pohonu, upínání a normalizované rozměry nástrojů, dále zástavbové parametry optického systému. Důležitým aspektem byla také technologičnost konstrukce s ohledem na její snadnou výrobitelnost a užitnou hodnotu přípravku. Jako program pro konstrukci přípravku byl zvolen strojírenský 3D CAD software SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes.

6.2.1 Konstrukční řešení přípravku

Přípravek je složen ze tří hlavních částí. Svařenec, ve kterém je nalisována tažnice je uchycen čtyřmi šrouby přes matice do T-drážek do upínací desky stolu. Upínací deska přídržovače, ve které je nalisován přídržovač, je propojena čtyřmi kalenými vodícími tyčemi s vodící deskou přídržovače, kterou ovládá přes vodící trn hydraulický válec. Lineární vedení obstarávají kuličková pouzdra osazená ve svařenci. Druhý hydraulický válec ovládá funkční část přípravku (tažník). Hlavní části přípravku jsou popsány na obr. 29.



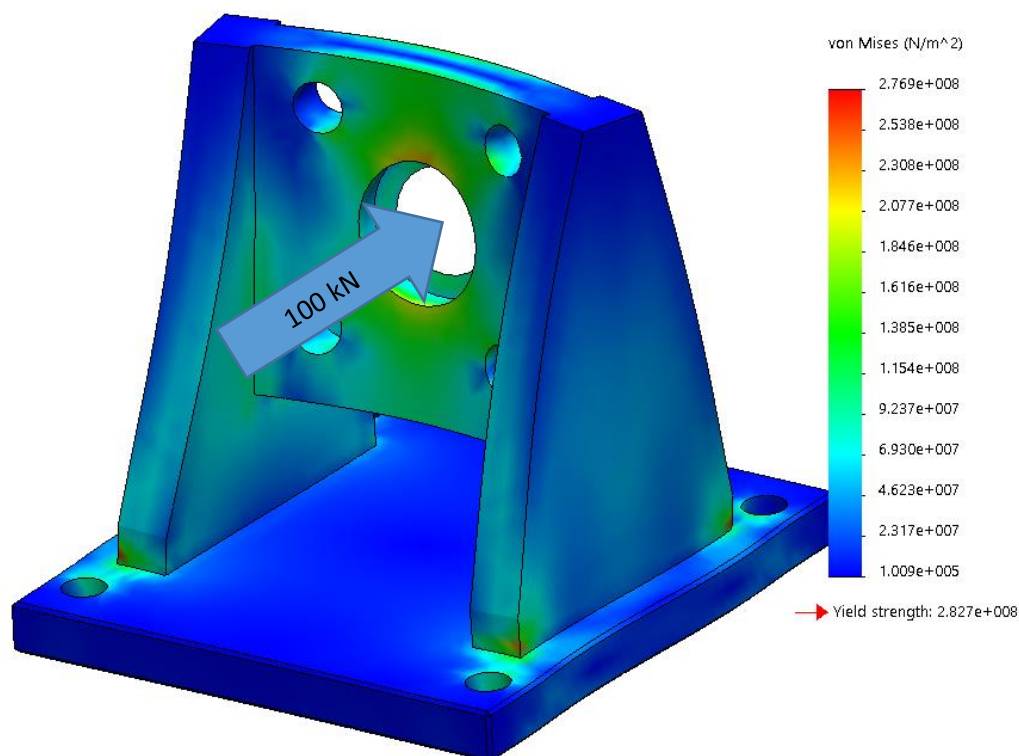
Obr. 29 Popis hlavních částí přípravku

6.2.2 Analýza napětí a deformací

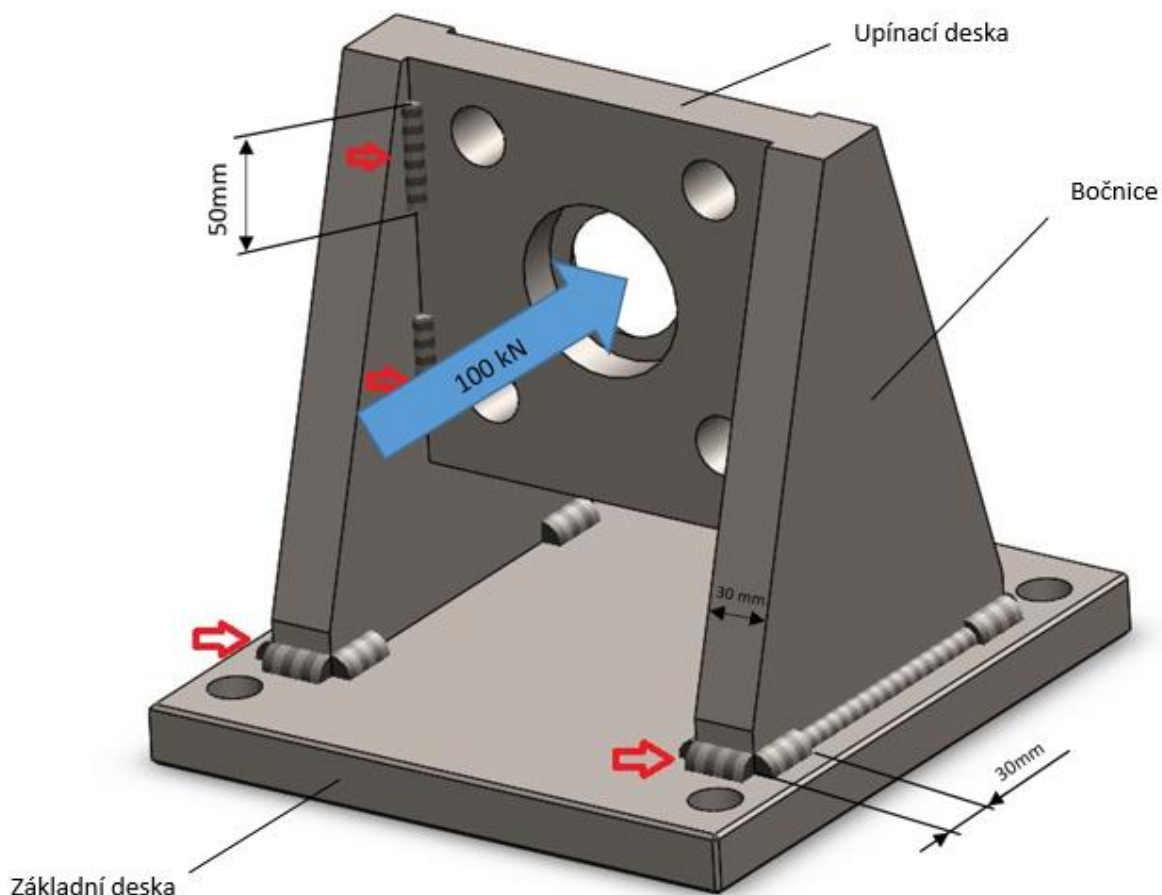
Po prvotním návrhu konstrukce byla analyzována a pevnostně propočtena kritická místa sestavy – svařenec a vodící tyče.

6.2.2.1 Svařenec

Výpočty byly zaměřeny na (podle analýzy napětí ve svařenci – obr. 30) kritická místa konstrukce (svary, na obrázku č. 31 označené červenými šipkami), kde bylo podle analýzy napětí a deformace po zatížení silou o hodnotě 100 kN (maximální síla hydraulického válce), která je vyznačená na obr. 30, 31, zjištěno nejvyšší napětí.



Obr. 30 Analýza napětí v konstrukci svařence



Obr. 31 Kritická místa svařence

- 1) Jako první byl proveden pevnostní výpočet svarů bočnic a desky kolmé na rovinu stolu (upínací deska – obr. 31).

Základní materiál desek - ocel S 235 (plech válcovaný za tepla, $t=30\text{mm}$)

Označení oceli dle ČSN: 11 375

Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel se zaručenou svařitelností.

Minimální mez kluzu pro výrobky o tloušťce 16 – 40 mm - $R_e = 225\text{ MPa}$

- Stanovení dovoleného napětí ve svaru

$$\sigma_{DSV} = \alpha \cdot \frac{R_e}{k} = 0,65 \cdot \frac{225}{1,5} = 97,5\text{ MPa}$$

k – součinitel bezpečnosti ($1,25 \div 2$)

α – součinitel svarového spoje (pro koutový svar $0,65 \div 0,75$)

Parametry koutového svaru: Počet svarových housenek 8, délka svaru 50mm, a=5mm

- Výpočet napětí ve svarech

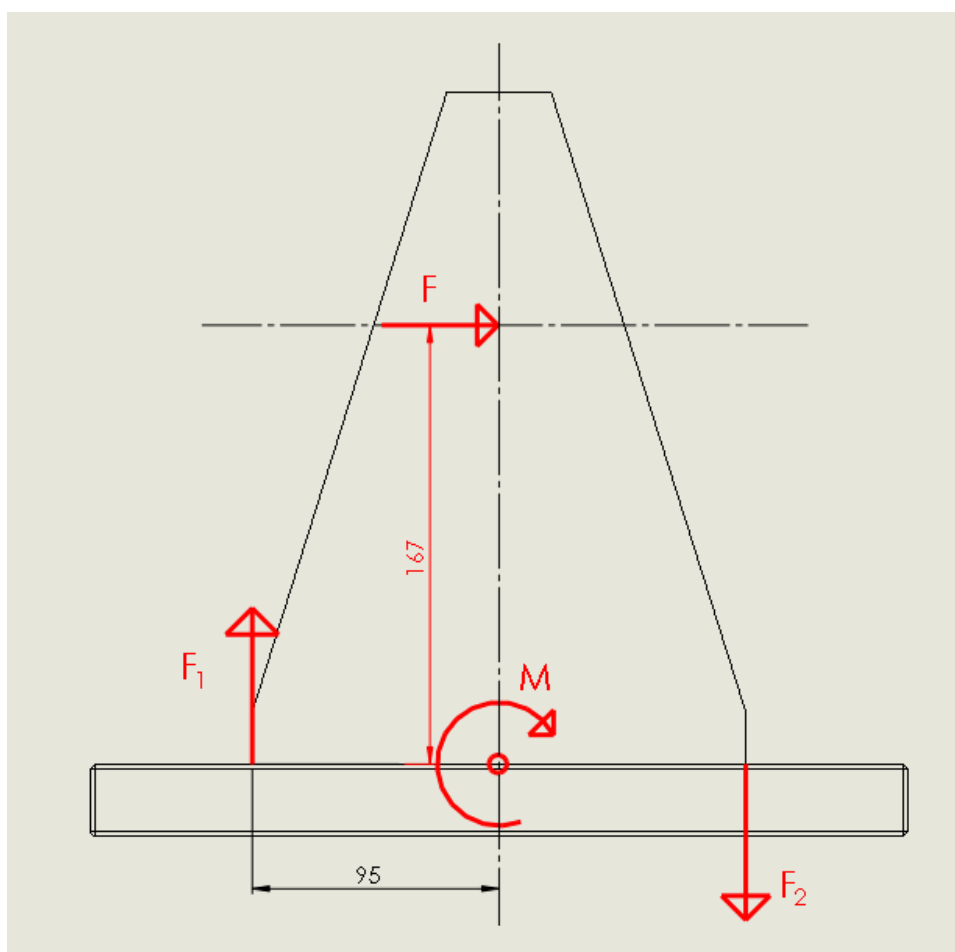
$$\sigma_{max} = \frac{F}{8 \cdot a \cdot l} = \frac{100000}{8 \cdot 5 \cdot 40} = 62,5 MPa$$

Délka svaru prokrácena o přídavek na nedokonalost svaru m

$$m = a$$

$$l = 50 - 2m = 50 - 2 \cdot 5 = 40 \text{ mm}$$

2) Výpočet svarů bočnic a základní desky svařence



Obr. 32 Schématický náčrt rozložení sil ve svařenci

Zatěžující síla $F = 100 \text{ kN}$

Rameno síly $l = 167 \text{ mm}$

Parametry koutových svarů: $l = 90 \text{ mm}$, $l_1 = 130 \text{ mm}$, $a = 7 \text{ mm}$, $a_1 = 5 \text{ mm}$

Výpočet momentu M :

$$M = F \cdot l = 100000 \cdot 0,167 = 16\,700 \text{ Nm}$$

Výpočet působících sil $F_1 = F_1' = F_2 = F_2'$

$$F_1 = \frac{\frac{M}{4}}{0,095} = \frac{\frac{16700}{4}}{0,095} = 43\,947 \text{ N}$$

Výpočet maximálního napětí ve svaru:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_1}{a \cdot l} = \frac{43947}{7 \cdot 83} = 75,6 \text{ MPa}$$
$$l = 90 - m = 90 - 7 = 83 \text{ mm}$$

Délka svaru zde byla pokráčena o pouze o hodnotu (přídavku na nedokonalost svaru – začáteční a koncový kráter) 1 m (v předchozím případě 2 m), protože svar na vnějších stranách přípravku plynule přechází do housenky, která nebyla ve výpočtu σ_{\perp} uvažována, ale svojí přítomností přispívá ke zpevnění konstrukce.

$$\sigma_{\parallel} = \frac{F}{a \cdot 4 \cdot l + a_1 \cdot l_1} = \frac{100000}{7 \cdot 4 \cdot 83 + 5 \cdot 260} = 27,5 \text{ MPa}$$

Jmenovatelem je v tomto případě celková délka svarů po obvodu spodní části bočnic (obr. 31) zmenšená o přídavky na nedokonalost svaru m a vynásobená jejich výškou.

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2} = \sqrt{75,6^2 + 27,5^2} = 80,4 \text{ MPa}$$

Konstrukce svařence splňuje požadavky na bezpečnost. Všechna vypočtená maximální napětí ve svarech nepřevyšují stanovenou dovolenou hodnotu napětí σ_{Dov} . Konstrukce z hlediska pevnostních výpočtů vyhovuje.

6.2.2.2 Vodící tyče

Materiál vodících tyčí – ocel 12 051

Tyče jsou povrchově kalené – tloušťka kalené vrstvy 1,6 mm, tvrdost 62 ± 2 HRC

Mez kluzu základního materiálu $R_e = 460$ MPa

Stanovení dovoleného napětí σ_D :

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{460}{1,7} = 270 \text{ MPa}$$

Tyče přenášejí napětí v tahu, jsou dimenzovány na maximální zatížení hydraulického válce $F = 100$ kN.

Výpočet napětí ve vodících tyčích:

Počet tyčí: 4

Pevnostní výpočet byl proveden pro tyče o průměru 12 mm, 14 mm, 16 mm

Z hlediska bezpečnosti vyhovují tyče $d = 16$ mm na koncích opatřené metrickým závitem s hrubým stoupáním M 16.

Výpočet průřezu vodící tyče, jako funkční průměr brán malý průměr závitu M16 - $d_3 = 13,271$ mm.

$$S = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 13,271^2}{4} = 138,2 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{4S} = \frac{100000}{4 \cdot 138,2} = 180,9 \text{ MPa}$$

Vypočtené napětí se nachází hluboko pod mezí dovoleného napětí materiálu vodících tyčí, přesto je z hlediska výpočtů vodící tyč nejvíce namáhanou součástí sestavy přípravku.

6.3 Výroba přípravku

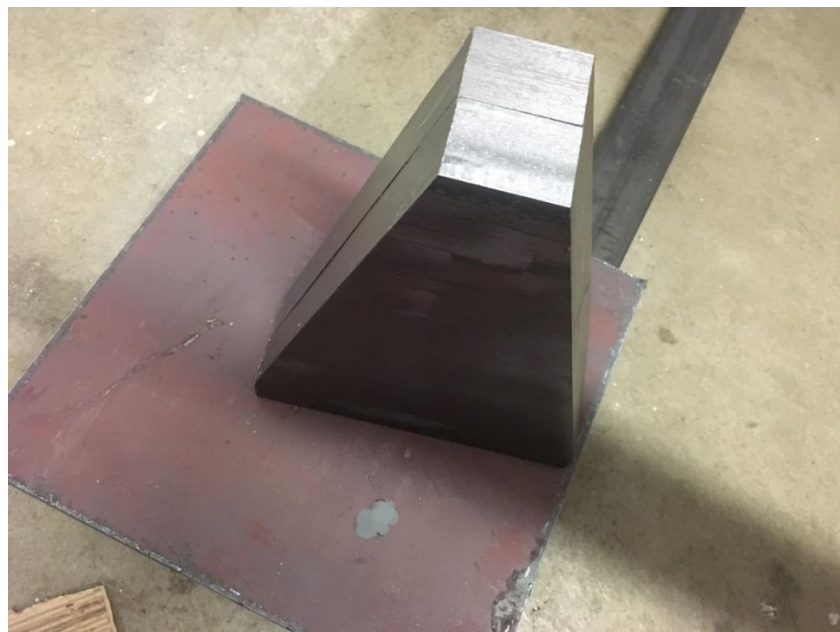
Jako výchozí materiál konstrukce svařence, vodící desky přidržovače a upínací desky přidržovače byl zvolen plech válcovaný za tepla $t=30\text{mm}$ z konstrukční oceli S235 (11 375). Polotovarem konstrukce byly čtvercové výpalky o rozměrech $200 \times 200 \text{ mm}$ a $320 \times 320 \text{ mm}$.

6.3.1 Frézování

Účelem frézování (obr. 33), byla příprava desek pro konstrukci svařence (obr. 34) a úprava rozměrů vodící desky přidržovače a upínací desky přidržovače na požadovaný rozměr.



Obr. 33 Frézování plechu na požadovaný rozměr



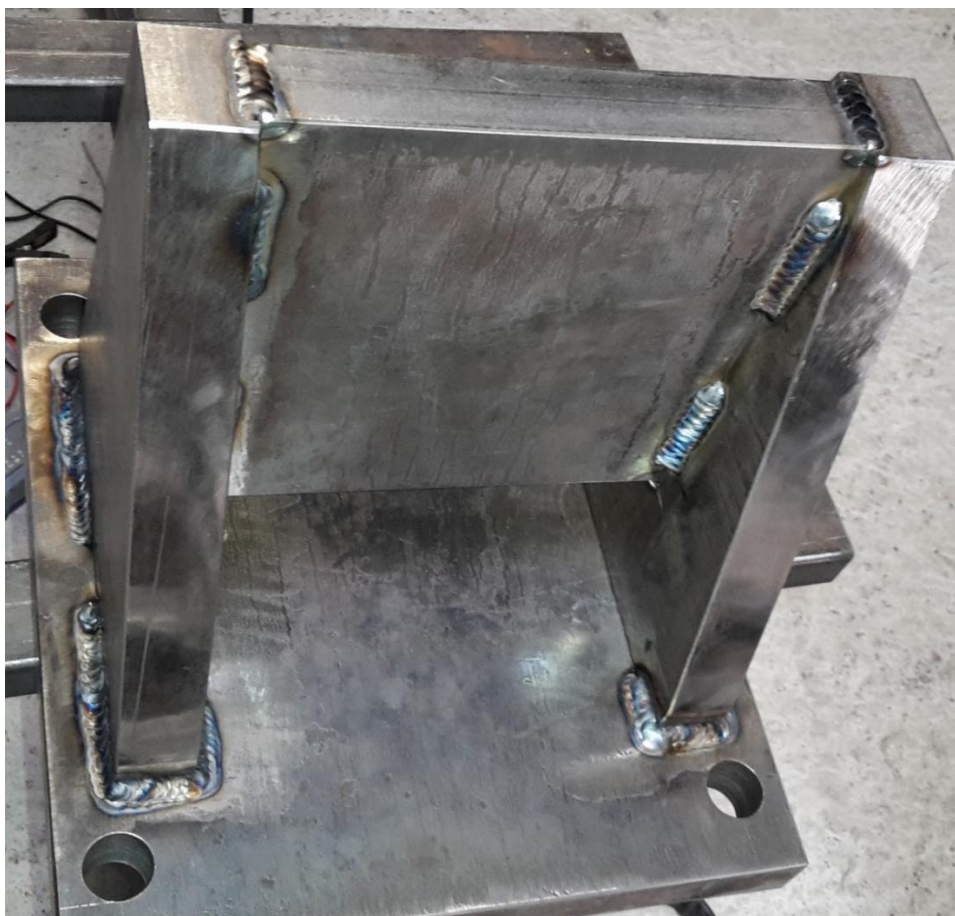
Obr. 34 Výstup operace frézování

Díry ve spodní desce svařence byly následně vyhotoveny na sloupové vrtačce a desky sestavy svařence připraveny pro operaci svařování.

6.3.2 Svařování

Před samotným svařováním proběhla příprava a odmaštění svarových ploch. Jako metoda svařování byla zvolena metoda TIG, která je zejména na čistotu svarových ploch velmi náročná.

Metoda TIG je velmi komplexní metoda svařování, zejména díky možnosti svařování široké škály základních materiálů od konstrukční oceli, nerezové oceli přes například měď, titan a mosaz. Elektrický oblouk hoří v ochranné atmosféře inertního plynu mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Přídavný materiál je do svaru přidáván nejčastěji ve formě drátu. Svary vyhotovené touto metodou vynikají svou kvalitou, geometrií a kresbou svarového kovu (obr. 35). Největší nevýhodou této metody svařování je její nízká produktivita a vysoká cena oproti jiným metodám svařování.



Obr. 35 Rozpracovaný svařenec

Desky byly v první řadě nastehovány do správné polohy, důležitá byla jejich vzájemná kolmost a poloha bočnic vzhledem k dírákům v základní desce. Rozměry svarových housenek byly voleny na základě pevnostních výpočtů z předchozí kapitoly. Mírné pokroucení desek, ke kterému během svařování došlo, bylo odstraněno obrobením svařence na CNC frézce.

Na CNC frézce byla následně obrobena také vodící deska přídržovače a upínací deska přídržovače. CNC technologie byla zvolena z důvodu složitosti obráběcí operace (rozteč děr pro vodící tyče, rozteč děr pro vodící pouzdra, otvory pro zalisování nástrojů).

6.3.3 Soustružení

Výroba nástrojů proběhla na konvenčním hrotovém soustruhu. Výstupem této operace byly funkční plochy přípravku (tažník, tažnice, přídržovač) a vodící trn (obr. 36).



Obr. 36 Funkční plochy přípravku a vodící trn

6.3.4 Tepelné zpracování

Nástroje bylo následně nutno tepelně zpracovat. Tepelné zpracování se skládalo z kalení a následného nízkoteplotního popouštění. Nástroje bylo nutné před kalením opatřit ochranným nátěrem, který zamezí oxidaci povrchu součásti při zahřívání na kalící teplotu. Přídržovač a tažnice byly vyhotoveny z oceli 19 312. Tažník byl vyroben z oceli 19 436. Jedná se o vysoko legované nástrojové oceli. Na základě materiálových vlastností byly pro dané materiály voleny kalící teploty. Pro ocel 19 312 byla zvolena kalící teplota 760°C, pro ocel 19 436 teplota 940°C. Ochlazovací médium - olej. Parametry popouštění - 200°C, 2 h.

6.3.5 Povrchová úprava a montáž

Na povrch přípravku byla nanесena dvousložková epoxidová barva, která se hodí pro strojní součásti. Barva by měla být otěruvzdorná, odolává běžným typům rozpouštědel a ropných produktů.

Proces vyhotovení povrchové úpravy charakterizují následující body:

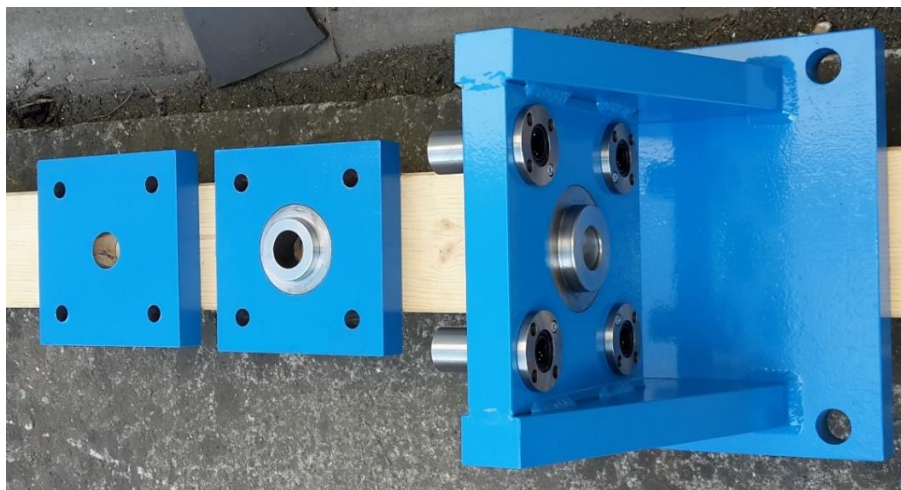
- Příprava povrchu
 - Kartáčování
 - Odmaštění
- Nanесení základní barvy
- Nanесení 2 vrstev modré krycí vrstvy

Po provedení povrchové úpravy následovala montáž přípravku.

Montáž byla složena z následujících činností:

- Nalisování nástrojů – svařenec a upínací deska přidržovače
- Ustavení vodících pouzder
 - Dolícování otvorů pro pouzdra
 - Upevnění pouzder pomocí metrických šroubů
- Finální kompletace přípravku na místě měření

Přípravek po vyhotovení povrchové úpravy, nalisování nástrojů a montáži vodících pouzder je vyobrazen na obr. 37.



Obr. 37 Proces výroby přípravku

6.4 Materiál pro zkoušku přípravku

Jako materiál pro zkoušku přípravku byl zvolen plech DC 06 ZE 50/50 BPO. Jedná se o hlubokotažný materiál. Tyto materiály se vyznačují nízkými mechanickými vlastnostmi – mez kluzu a mez pevnosti, ale mají vysokou hodnotu tažnosti. Základní mechanické vlastnosti byly zkoumány v rámci diplomové práce Bc. Jana Čechlovského. Z jeho práce byl převzat graf statické zkoušky tahem – porovnání vlastností materiálu v závislosti na směru válcování plechu (obr. 38) a základní mechanické vlastnosti testovaného materiálu (tab. 2).

Označení materiálu: DC 06 ZE 50/50 BPO

DC – ploché výrobky pro tváření za studena

06 – třída hlubokotažnosti

50/50 – tloušťka zinkového povlaku – 5 μm

B – druh povrchu (jakost) – výrobky jsou dodávány s jedním z povrchů – buďto A nebo B

PO – fosátovaný a olejovaný [16]

Základní mechanické vlastnosti a chemické složení dle normy EN 10152 [16]:

$R_{p0,2}$ – 190 MPa

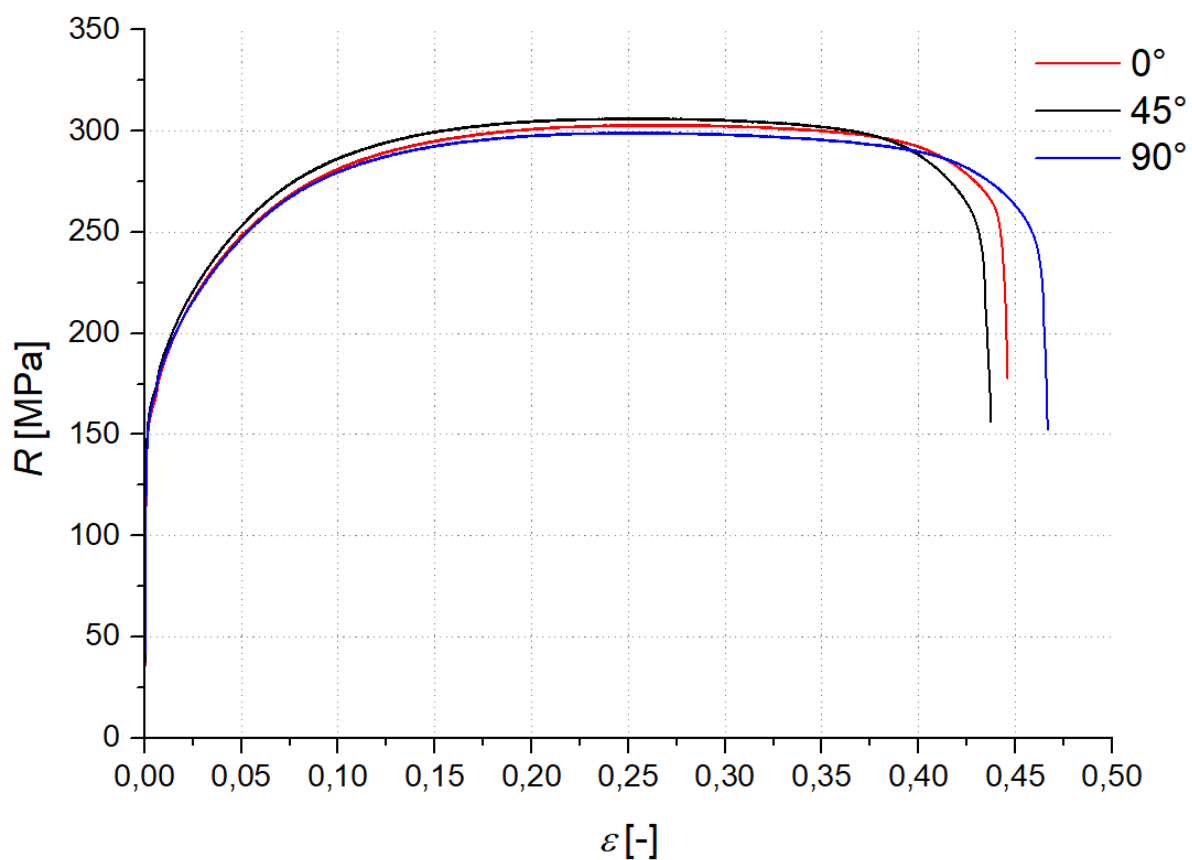
R_m – 270 – 350 MPa

$A_{80\text{mm}}$ – 37 %

Tab. 1 Chemické složení materiálu

Chemické složení – hmotnostní podíl v %				
C	P	S	Mn	Ti
0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

Statická zkouška tahem



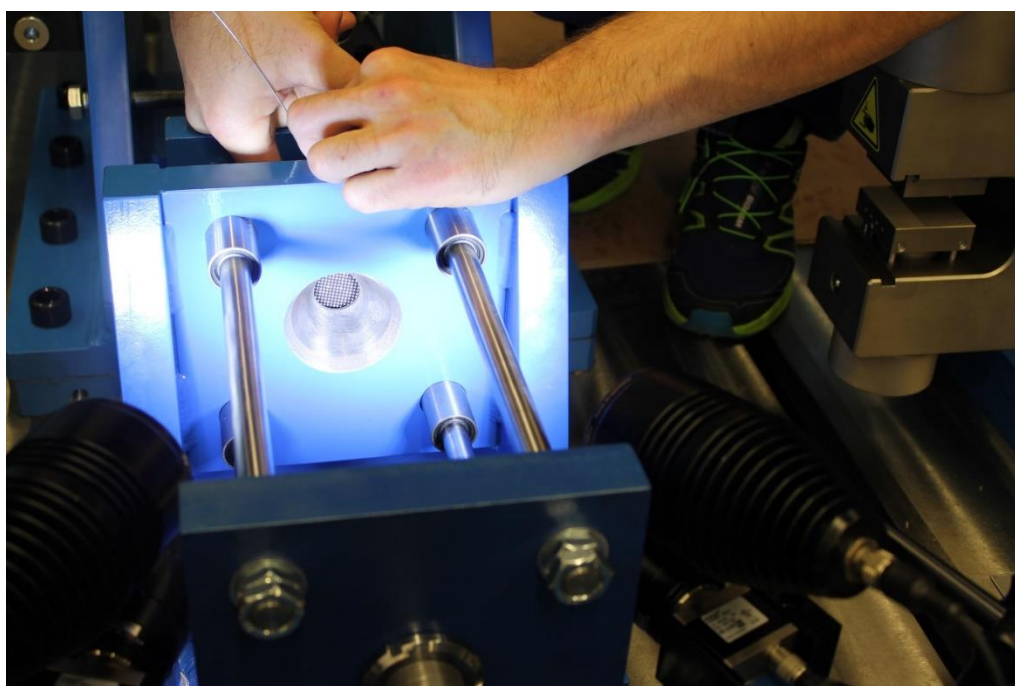
Obr. 38 Porovnání mechanických vlastností materiálu DC 06 ZE 50/50 BPO v závislosti na směru válcování plechu

Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností materiálu DC 06 ZE 50/50 BPO v závislosti na směru válcování plechu

Směr odebrání vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
0°	$158,7 \pm 0,4$	$303,8 \pm 1,0$	$26,2 \pm 0,26$	$44,6 \pm 0,36$
45°	$163,7 \pm 0,4$	$306,7 \pm 0,5$	$24,9 \pm 0,74$	$43,5 \pm 0,76$
90°	$161,8 \pm 0,5$	$299,8 \pm 0,4$	$25,3 \pm 0,33$	$45,6 \pm 2,83$

6.5 Test funkčnosti přípravku pro zvolený materiál

Po ustavení přípravku na biaxiální zařízení byl instalován bezkontaktní systém pro analýzu deformace Mercury RT. V první fázi bylo nutné vyřešit vhodné osvětlení vzorku, aby intenzita osvitu byla po celé sledované ploše pokud možno konstantní a nedocházelo k přesvícení vzorku v průběhu provádění testu - tažení. Pro tyto účely bylo zvoleno LED osvětlení za pomoci dvou lamp (obr. 39). Následovala kalibrace systému pomocí kalibrační destičky. Ke kalibraci systému bylo třeba tuto destičku ustavit do několika, předem daných kalibračních poloh. Po kalibraci byl systém připraven k měření.

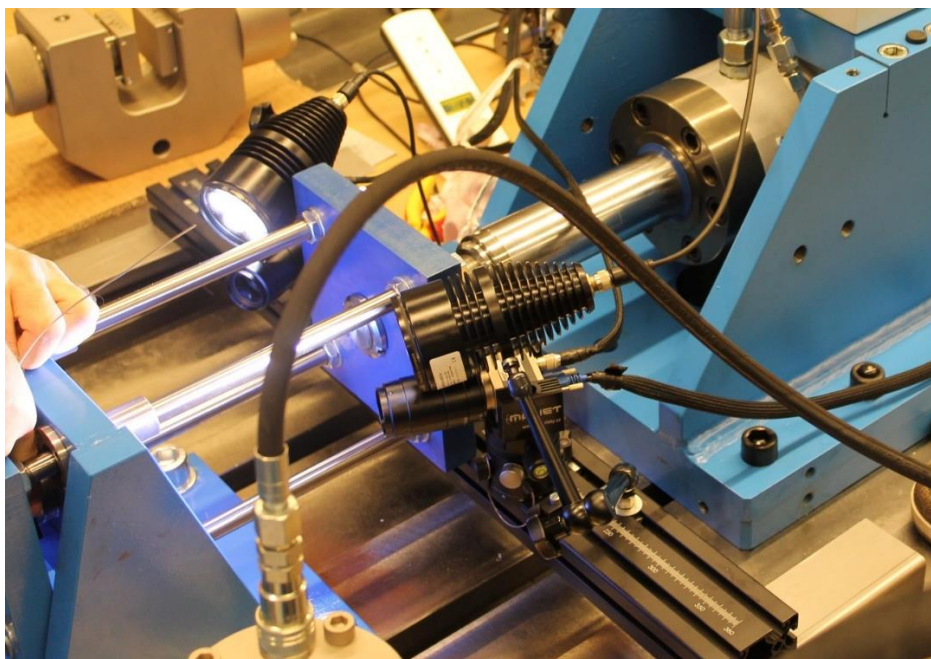


Obr. 39 Kalibrace optického systému

Nasnímaná data průběhu zkoušky byla vyhodnocena softwarem Mercury RT.

Mercury RT je svou podstatou velmi podobný systému Aramis. Stejně jako systém Aramis, využívá k vyhodnocování principu digitální korelace obrazů (DIC). Systém je pro snímání deformace opatřen dvěma kamerami MONET 3D s rozlišením 9 MPx. Kamery byly umístěny na hliníkovém stativu (obr. 39 a obr. 40).

Software zaznamenává deformaci vzorku v průběhu testu. Frekvence snímání je volitelná a závisí na kapacitě použitého úložiště dat. Pro samotné měření je důležité nanesení patternu na povrch zkoumaného vzorku. Software si poté, na základě stupňů šedi rozdělí oblast do menších podoblastí, které jsou následně snímány v průběhu testu.



Obr. 40 Umístění kamer

Vstupní parametry zkoušky:

- Přidržovací síla 20kN
- Frekvence snímkování 30Hz
- Rychlost posuvu tažníku 50mm/min
- Materiál DC 06 ZE 50/50 BPO, $t = 0,7$ mm

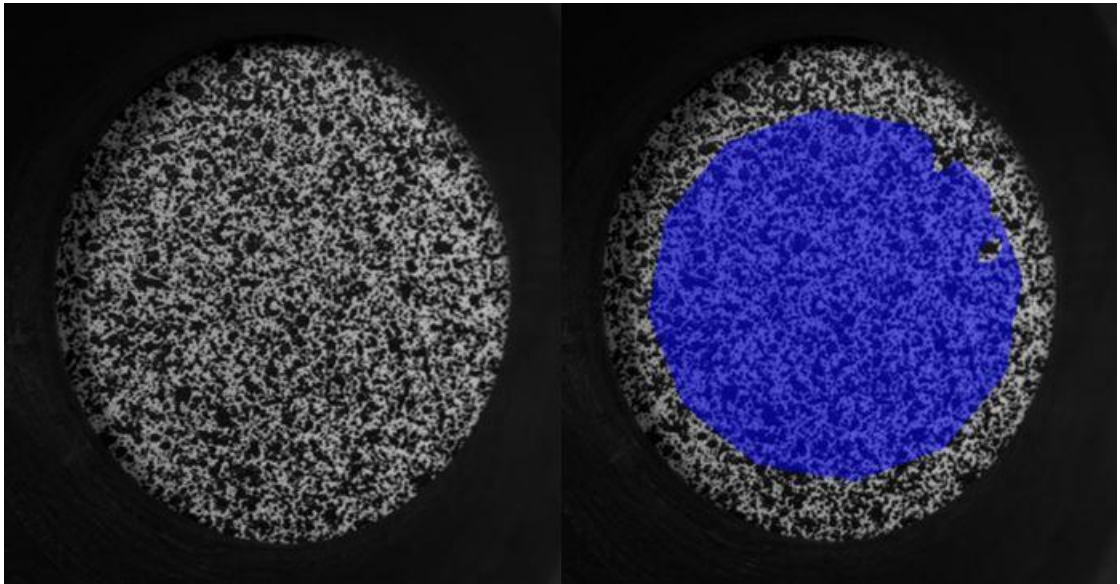
Na vyhodnocované sekvenci snímků je zaznamenán průběh deformace vzorku.

Výstupní a vyhodnocené parametry zkoušky:

- Celková doba trvání zkoušky - 20s
- Prohloubení vzorku - 13,98 mm
- Graf průběhu síly
- Graf průběhu hlavní a vedlejší deformace
- Graf průběhu ztenčení materiálu

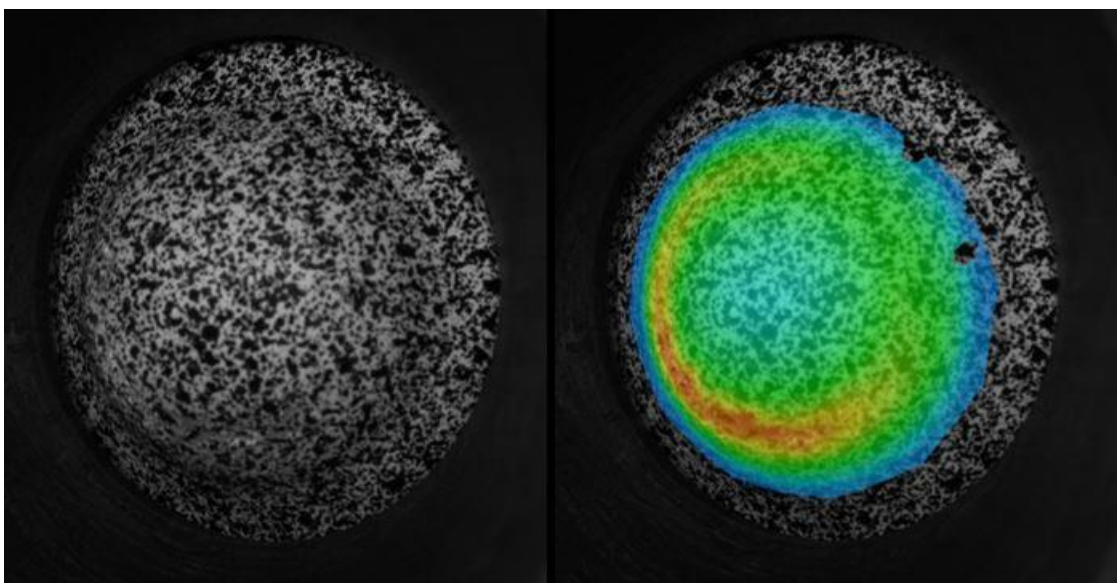
6.6 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Počátek měření je zaznamenán na obrázku č. 41. Ze snímku je patrný černobílý pattern nanesený na povrch vzorku. Modře je vyznačena oblast, kterou následně software vyhodnocuje.

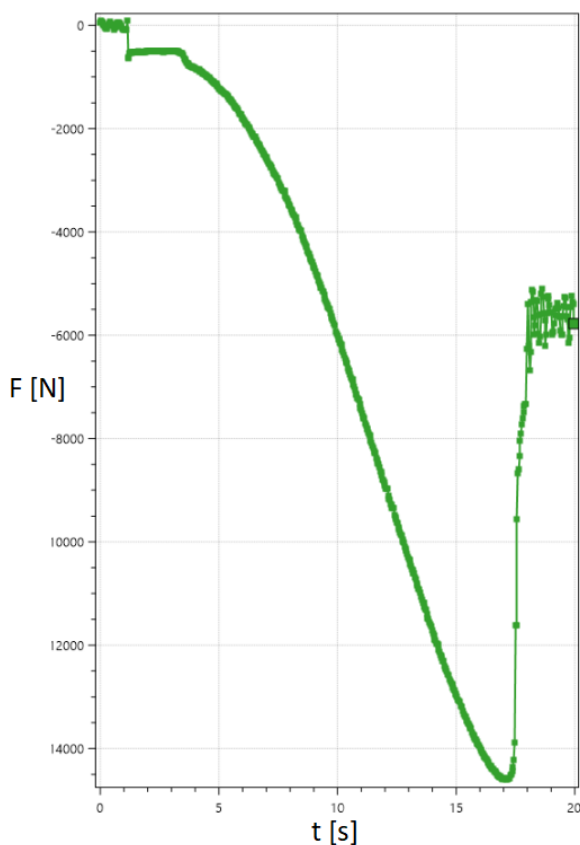


Obr. 41 Počátek měření

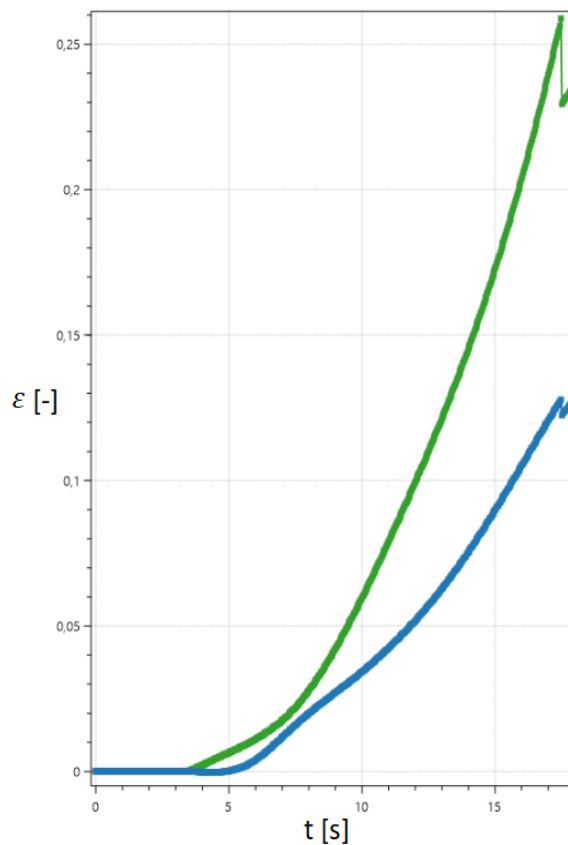
Na následujícím obrázku (obr. 42) je vyobrazen mezní stav deformace vzorku těsně před vznikem trhliny. Ke vzniku trhliny dochází následně, v červené oblasti.



Obr. 42 Mezní stav



Obr. 43 Graf průběhu síly



Obr. 44 Graf průběhu deformace

Průběh síly tažníku je patrný z grafu průběhu síly (obr. 43). Síla od počátku testu strmě narůstá až do okamžiku vzniku trhliny.

Ke vzniku trhliny dochází v 17. sekundě záznamu při síle, která převyšuje hranici 14 kN.

Ze snímání plochy je možné vyhodnotit průběh hlavní (zelená křivka) a vedlejší (modrá křivka) deformace, který je vyobrazen na grafu průběhu deformace (obr. 44).

Výhodou zvolného způsobu řešení je možnost propojení systému Mercury RT s optickým snímáním (vyhodnocení vzorku fotogrammetrickou metodou). Zároveň lze pomocí softwaru snímat a vyhodnocovat polohu tažníku a sílu, kterou působí tažník na vzorek v konkrétním okamžiku. Řešení tedy nabízí možnost vyhodnocení Erichsenovy zkoušky a sledování vzniku mezního stavu dvojím způsobem, buďto z hlediska silového – snímání síly a polohy tažníku nebo z hlediska plošného rozvoje deformace – opticky.

7. Závěr

V rámci řešení diplomové práce byl v souladu se zadáním proveden konstrukční návrh přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena tak, aby bylo vyhověno požadavkům umístění přípravku na nové biaxiální zařízení s možností bezkontaktního snímání deformace v průběhu testu. Zvolené konstrukční řešení, následná výroba a testy funkčnosti přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena prokázaly správnost řešení diplomové práce a lze předpokládat jeho další využití v rámci výuky i výzkumu mechanických vlastností hlubokotažných materiálů prováděných na KSP TU v Liberci.

Komplexní řešení nového přípravku spočívající v jeho propojení s hydraulickým biaxiálním zařízením a bezkontaktním systémem pro analýzu deformace Mercury RT, umožňuje provádět testy hloubením dle Erichsena na kvalitativně vyšší úrovni, než je standardní provedení daného testu. Oproti konvenční technologické zkoušce, kde je směrodatně vyhodnocována pouze hodnota prohloubení vzorku v okamžiku vzniku trhliny, je u nově navrženého přípravku možné zkoušku vyhodnocovat dvojím způsobem. Rozvoj a vznik mezního stavu je možné sledovat opticky - z deformační stránky nebo pomocí snímání okamžité síly a polohy tažníku. Možná variabilita volby vstupních parametrů jako je velikost přidržovací síly a rychlost posuvu indentoru spolu s přesným a moderním fotogrammetrickým způsobem vyhodnocení deformace testovaného vzorku, posunuje zkoušku hloubením podle Erichsena na novou úroveň a dává tím možnost sledovat vlastnosti materiálu z širšího pohledu.

8. Použitá literatura

- [1] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [2] BAREŠ, Karel. *Lisování*. 1971. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976.
- [3] LUHMANN, Thomas. *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-057-2.
- [4] BEHRING, Dirk, Jan THESING, Holger BECKER a Robert ZOBEL. *Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations* [online]. Society of Automotive Engineers, 2001 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2a4a/c3dcd6d60648471dda7138cc48580561ab1a.pdf>
- [5] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] ČSN EN ISO 20482: *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsen*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [7] ČSN EN ISO 6892-1: *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **2015**(10) [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
- [9] PICKERD, Vanessa. *Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events* [online]. Maritime Division Defence Science and Technology Organisation, , 40 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a594163.pdf>
- [10] *Zkoušky bez porušení materiálu – nedestruktivní zkoušky* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf
- [11] MACEK, Karel. *STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ* [online]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní - Ústav materiálového inženýrství, , 4 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-5_technologicke-vlastnosti.pdf
- [12] DOC. ČERMÁK. *Zjišťování anizotropie z tahové zkoušky* [online]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní - Ústav strojírenské technologie, , 2 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/126/6-anizotropie.pdf>

- [13] Diagram zkoušky. In: *ELUC* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1566>
- [14] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ*. 2013. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3361-3.
- [15] KHLIF, Mohamed, Moufida MHADHBI a Chedly BRADAI. *Development of Bulge Test for Aluminum Sheet Metal* [online]. 2015 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277273781_Development_of_Bulge_Test_for_Aluminum_Sheet_Metal
- [16] ČSN EN 10152: *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované - Technické dodací podmínky*. Praha: Český normalizační institut, 1996.

Seznam obrázků

Obr. 1 Smluvní a skutečný tahový diagram [13]	15
Obr. 2 Odběr vzorků pro měření anizotropie plechů	17
Obr. 3 Zásoba plasticity materiálu [13]	18
Obr. 4 Schéma zkoušky hloubením dle Erichsena [6]	19
Obr. 5 Typický tvar vzorku pro plech vhodný ke hlubokému tažení (vlevo), nevyhovující vzorek (vpravo) [1]	20
Obr. 6 Princip kalíškovací zkoušky	21
Obr. 7 Cípatost výtažku	22
Obr. 8 Průběh síly při Gross-Engelhardtově zkoušce [1]	23
Obr. 9 Schéma zkoušky podle Siebela a Pompa [1]	23
Obr. 10 Fukuiho zkouška [1]	24
Obr. 11 Schéma hydraulické zkoušky	25
Obr. 12 Bulge test schematicky [15]	26
Obr. 13 Princip centrální projekce [3]	28
Obr. 14 Matematický základ fotogrammetrie – model kamery [4]	29
Obr. 15 Aplikace fotogrammetrie v automobilovém průmyslu - nárazové testy vozidel [3]	32
Obr. 16 Aplikace fotogrammetrie ve stavebnictví [3]	32
Obr. 17 Optický měřicí systém Aramis [8]	34
Obr. 18 Ručně nanesený pattern [9]	34
Obr. 19 Kalibrační destička (vlevo) a kalibrační kříž [9]	35
Obr. 20 Analýza deformace plechu systémem Aramis [8]	35
Obr. 21 Zařízení pro biaxiální zkoušení plechů	36
Obr. 22 Hydraulický válec Häenchen	38
Obr. 23 Analýza osové vzdálenosti od roviny stolu	39
Obr. 24 Zástavbové rozměry hydraulického válce	39
Obr. 25 Normalizované rozměry nástrojů [6]	40
Obr. 26 Konstrukční uspořádání pro zástavbu optického systému (horní pohled)	40
Obr. 27 Umístění kamer	41
Obr. 28 Upínací deska stolu	41
Obr. 29 Popis hlavních částí přípravku	42
Obr. 30 Analýza napětí v konstrukci svařence	43
Obr. 31 Kritická místa svařence	44
Obr. 32 Schématický náčrt rozložení sil ve svařenci	45
Obr. 33 Frézování plechu na požadovaný rozměr	48
Obr. 34 Výstup operace frézování	48
Obr. 35 Rozpracovaný svařenec	49
Obr. 36 Funkční plochy přípravku a vodící trn	50
Obr. 37 Proces výroby přípravku	51
Obr. 38 Porovnání mechanických vlastností materiálu DC 06 ZE 50/50 BPO v závislosti na směru válcování plechu	53
Obr. 39 Kalibrace optického systému	54
Obr. 40 Umístění kamer	55
Obr. 41 Počátek měření	56
Obr. 42 Mezní stav	56
Obr. 43 Graf průběhu síly	57
Obr. 44 Graf průběhu deformace	57